



UNIVERSITAT DE  
BARCELONA

## Modelo de restauración ambiental centrado en la fijación de carbono en microcuencas de la zona central de Chile

Juan Luis Araya Silva

**ADVERTIMENT.** La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX ([www.tdx.cat](http://www.tdx.cat)) i a través del Dipòsit Digital de la UB ([diposit.ub.edu](http://diposit.ub.edu)) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX ni al Dipòsit Digital de la UB. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX o al Dipòsit Digital de la UB (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

**ADVERTENCIA.** La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR ([www.tdx.cat](http://www.tdx.cat)) y a través del Repositorio Digital de la UB ([diposit.ub.edu](http://diposit.ub.edu)) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR o al Repositorio Digital de la UB. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR o al Repositorio Digital de la UB (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

**WARNING.** On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX ([www.tdx.cat](http://www.tdx.cat)) service and by the UB Digital Repository ([diposit.ub.edu](http://diposit.ub.edu)) has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized nor its spreading and availability from a site foreign to the TDX service or to the UB Digital Repository. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service or to the UB Digital Repository is not authorized (framing). Those rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author.

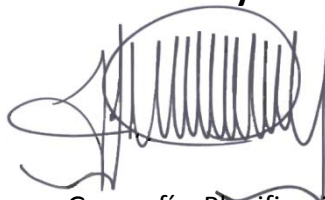
Facultat de Geografia i Història  
Universitat de Barcelona

Programa de Doctorado: Geografía, Planificación Territorial y Gestión Ambiental

## **MODELO DE RESTAURACION AMBIENTAL CENTRADO EN LA FIJACION DE CARBONO EN MICROCUENCAS DE LA ZONA CENTRAL DE CHILE**

Presentado por:

**Juan Luís Araya Silva**



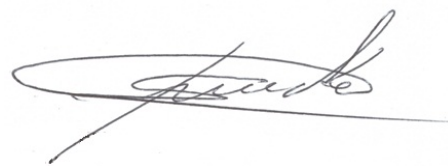
Para optar al título de Doctor en: Geografía. Planificación Territorial y Gestión Ambiental

Director de la Tesis



Dr. Xavier Úbeda Cartaña.  
Departament de Geografia Física  
i Anàlisi Geogràfica Regional.  
Universitat de Barcelona.

Director de la Tesis



Dr. Samuel Francke Campaña  
Corporación Nacional Forestal  
(CONAF)  
Chile

Octubre 2015

## AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer muy sinceramente a mi director de tesis Dr. Xavier Úbeda de la Facultad de Geografía de la Universidad de Barcelona, quien en una etapa con circunstancias adversas creyó en este proyecto y en forma muy especial accedió a dirigir este trabajo.

Muy especialmente a mi maestro, quien me iniciara en el estudio de las cuencas hidrográficas, mi co – director Sr. Samuel Francke Ph.D. Jefe nacional del “Programa de restauración de cuencas hidrográficas de la zona semiárida de Chile” de la Corporación Nacional Forestal (CONAF), en Santiago de Chile; por creer en mi proyecto y por su constante apoyo en todas las circunstancias bajo las cuales se desarrolló esta tesis doctoral y por su eterna incondicionalidad que permitió la realización de este trabajo.

A mi mentor en la Universidad de Santiago de Chile, Sr Rogers Atero Montes Ph.D. del Departamento de Ingeniería Informática de la Facultad de ingeniería, Universidad de Santiago de Chile, quien durante extensas jornadas motivado solo por un sentimiento de fraternidad me enseñó lineamientos claves sobre la investigación, apoyó en forma incondicional esta tesis y siempre tuvo tiempo para poner sus conocimientos para la concreción de este trabajo, que sin su apoyo no habría sido posible.

A mi compañero y amigo Sr. Néstor Ahumada Galaz de la Facultad de Ciencias agropecuarias y ambientales de la Universidad de Las Américas por su apoyo constante en mi ingreso al programa de doctorado y en la realización de este seminario.

Agradezco al Ing. Forestal Sr. Celso Carnieletto del Programa de restauración de cuencas hidrográficas; al Sr. Juan Vera, Jefe del vivero San Pedro de Melipilla; y a todo el personal de CONAF en Santiago de Chile que contribuyó y apoyó de alguna u otra forma la realización de esta investigación.

Agradezco muy sinceramente a la Dra. Marcela Wilkens, académica de la Facultad de Química y Biología de la Universidad de Santiago de Chile, quien me inició en la investigación de la microbiología ambiental y además me apoyó en forma absolutamente solidaria facilitando requerimientos técnicos y humanos para llevar a cabo objetivos claves de mi trabajo.

A la Srta. Marlene Manzano, bioquímica de la Facultad de biología de la Pontificia Universidad Católica de Chile; agradezco su deferencia y actitud para poner el apoyo técnico de su laboratorio en forma muy solidaria para llevar a cabo investigaciones durante la realización del trabajo que sin su disposición habrían resultado imposibles de llevar a cabo.

A mis amigos Carlos Romero de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Playa Ancha de Ciencias de la Educación, Miguel Barros de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso y Janpiero Onetto de la Facultad de Educación de la Universidad Santo Tomás quienes siempre apoyaron y colaboraron en este proyecto.

A todos quienes de una u otra forma aportaron a la materialización de este proyecto.

**DEDICADO A**

*Mis padres, por su constante y desinteresado apoyo en la realización de mis metas y esperanzas.*

*Por el enorme esfuerzo que durante años realizaron para convertirme en un profesional y su orgullo al concretar uno de los más grandes anhelos de mi vida.*





*“La tierra no pertenece al hombre, el hombre pertenece a la tierra. El hombre no ha tejido la red de la vida: es sólo una hebra de ella. Todo lo que haga a la red se lo hará a sí mismo. Lo que ocurre a la tierra ocurrirá a los hijos de la tierra. Todas las cosas están relacionadas como la sangre que une a una familia. Esta tierra es preciosa y el causarle daño significa mostrar desprecio hacia su Creador”.*

Seattle  
1855

*“Las riqueza en bosques es el bienestar de la nación. Un pueblo que destruye sus bosques, destruye sus propios recursos naturales. El que planta un bosque aumentará su riqueza y la de sus hijos. El que destruye un árbol mata un ser viviente. El que planta un árbol goza de sus beneficios y deja a las generaciones futuras una señal de su paso por la tierra”.*

Federico Albert Faupp  
1910

*“El desafío que impone luchar por salvar al planeta del deterioro a que lo expone la actividad humana, nos exige empezar por entender que la defensa del medio ambiente no es sólo un derecho de cada hombre, sino, al mismo tiempo, un "deber humano" que nos obligue a tomar conciencia y poner énfasis en la necesidad de que los hombres nos exijamos más a nosotros mismos en bien de la supervivencia de la propia vida humana”.*

Patricio Aylwin Azocar  
1992

## TABLA DE CONTENIDOS

<b>Resumen</b> .....	I
<b>Abstract</b> .....	III
<b>Declaración de originalidades</b> .....	V
<b>Abreviaturas y simbologías</b> .....	VI
<b>Índice de figuras</b> .....	VIII
<b>Índice de tablas</b> .....	XVII
<b>Prólogo</b> .....	XXIV
<b>Capítulo I INTRODUCCIÓN</b> .....	1
1.1. NOCIONES BÁSICAS.....	4
1.2. ASPECTOS GENERALES.....	5
1.2.1. Antecedentes del tema .....	5
1.2.2. Caracterización del trabajo.....	6
1.3. INTRODUCCIÓN AL TEMA.....	8
1.3.1. Bases holísticas del tema.....	8
1.3.2. Antecedentes del problema.....	11
1.3.2.1. Cambios en los suelos.....	11
1.3.2.2. Delimitación del problema.....	12
1.4. OBJETIVOS E HIPOTESIS.....	15
1.5. ORGANIZACIÓN DE LA TESIS.....	15
<b>Capítulo II ESTADO DEL ARTE</b> .....	19
2.1. GESTIÓN DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS.....	23
2.1.1. Situación internacional en gestión de cuencas hidrográficas.....	23
2.1.1.1. Antecedentes a nivel mundial.....	23
2.1.1.2. Gestión de cuencas hidrográficas en Latinoamérica.....	27
2.1.2. Gestión medioambiental de cuencas y suelos en Chile.....	31
2.1.2.1. Gestión de cuencas hidrográficas en Chile.....	31
2.1.2.2. Análisis y estudios de suelos en Chile.....	40
2.2. ANTECEDENTES SOBRE INVESTIGACIONES DE FIJACION DE CARBONO ATMOSFÉRICO.....	42
2.2.1. Antecedentes a nivel internacional.....	42
2.2.2. Antecedentes en Chile.....	43
2.3. DISCUSIÓN.....	45
2.4. BIBLIOGRAFÍA ESPECÍFICA.....	48
<b>Capítulo III CARACTERIZACION DEL EMPLAZAMIENTO PARA ANALIZAR..</b>	57
3.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA.....	60
3.2. UBICACIÓN ADMINISTRATIVA.....	61

3.3.	OROGRAFÍA.....	63
3.4.	GEOLOGÍA.....	63
3.5.	RELIEVE.....	63
3.6.	SUELO.....	64
3.7.	CLIMA.....	65
3.8.	HIDROLOGÍA.....	67
3.9.	VEGETACIÓN.....	67
3.10.	AREA DE TRABAJO.....	68
	3.10.1. Aspectos generales.....	68
	3.10.2. Microcuencas hidrográficas.....	71
3.11.	CUANTIFICACIÓN DEL RECURSO PAISAJE.....	83
3.12.	DISCUSION.....	86
3.13.	BIBLIOGRAFÍA ESPECÍFICA.....	89

**Capítulo IV GESTIÓN DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS Y TIPIFICACIÓN DE SUELOS..... 91**

4.1.	CUENCAS HIDROGRÁFICAS.....	95
	4.1.1. Nociones básicas.....	95
	4.1.2. Caracterización general de las cuencas hidrográficas en Chile.....	100
	4.1.3. Restauración hidrológico forestal de cuencas hidrográficas.....	103
	4.1.3.1. Antecedentes básicos de la restauración en cuencas hidrográficas.....	103
	4.1.3.2. Alteraciones biológicas de la deforestación de cuencas.....	105
	4.1.3.3. Alteraciones hidrológicas de la deforestación de cuencas.....	105
	4.1.3.4. Restauración de la vegetación.....	106
	4.1.3.5. Factores y procesos básicos que intervienen en la restauración..	107
	4.1.4. Instituciones ligadas a la gestión de cuencas en Chile.....	109
4.2.	ESTRUCTURA Y PROPIEDADES DEL SUELO.....	111
	4.2.1. Aspectos físicos del suelo.....	112
	4.2.1.1. Composición del suelo.....	112
	4.2.1.2. Características del suelo.....	114
	4.2.1.2.1. Pendiente.....	114
	4.2.1.2.2. Profundidad.....	115
	4.2.1.2.3. Textura.....	115
	4.2.1.2.4. Estructura.....	117
	4.2.1.2.5. Pedregosidad y rocosidad.....	118
	4.2.2. Aspectos químicos del suelo.....	119
	4.2.2.1. Fases y constituyentes del suelo.....	119
	4.2.2.1.1. Compuestos minerales.....	119
	4.2.2.1.2. Compuestos orgánicos.....	121
	4.2.2.2. Fertilidad.....	123
	4.2.2.3. PH.....	123
	4.2.3. Caracterización biológica del suelo.....	124
	4.2.3.1. Antecedentes Generales.....	124
	4.2.3.2. Distribución bacteriana en los suelos.....	125
	4.2.3.3. Tipo de nutrición bacteriana en el suelo.....	127
	4.2.3.4. Factores ambientales que determinan el desarrollo bacteriano.....	128

4.2.3.4.1.	Temperatura.....	128
4.2.3.4.2.	Humedad.....	129
4.2.3.4.3.	Biodisponibilidad.....	129
4.2.3.4.4.	Nutrientes inorgánicos.....	130
4.2.4.	Aspectos hidrológicos del suelo.....	130
4.2.4.1.	Ciclo hidrológico.....	130
4.2.4.2.	Aspectos hidrológicos de una cuenca hidrográfica.....	132
4.3.	CARACTERIZACION Y DINAMICA DEL CARBONO.....	134
4.3.1.	Los bosques como reservorio de carbono.....	135
4.3.2.	El carbono en ecosistemas forestales.....	136
4.3.3.	Desbalance de los niveles de carbono en las matrices ambientales.....	137
4.4.	DISCUSIÓN.....	138
4.5.	BIBLIOGRAFÍA ESPECÍFICA.....	142
<b>Capítulo V PROPUESTA METODOLOGICA.....</b>		<b>149</b>
5.1.	EXTRACCION.....	155
5.2.	ANALISIS.....	156
5.3.	ESPECIFICACION.....	158
5.4.	EVALUACION.....	159
5.4.1	Metodología para el análisis de la situación pos intervención.....	159
5.4.1.1.	Descripción de la situación actual de las microcuencas.....	159
5.4.1.2.	Metodología para la cuantificación morfométrica de las microcuencas de Alto Loica.....	161
5.4.1.3.	Metodología del modelo heurístico para la cuantificación de los impactos ambientales en Alto Loica.....	168
5.4.2	Descripción y análisis integral de suelos.....	172
5.4.2.1	Análisis químico.....	173
5.4.2.1.1	Caracterización del entorno del lugar de toma de muestras.....	174
5.4.2.1.2	Toma de muestras.....	180
5.4.2.1.3	Análisis de las muestras.....	180
5.4.2.2	Análisis físico.....	181
5.4.2.2.1	Creación de transeptos y muestreo de suelos.....	182
5.4.2.2.2	Construcción de calicatas y análisis del perfil del suelo..	183
5.4.2.3	Análisis hidrológico.....	184
5.4.2.3.1	Hidrología de suelos.....	185
5.4.2.3.2	Metodología para el análisis de cauces.....	188
5.4.2.4	Análisis biológico.....	191
5.4.2.4.1	Toma de muestras.....	192
5.4.2.4.2	Análisis microbiológico de las muestras.....	193
5.4.3.	Determinación del modelo fenomenológico de restauración ecológico – ambiental.....	197
5.4.4.	Estimación de la captura de carbono atmosférico y formulación del modelo de redes neuronales artificiales.....	198
5.4.4.1	Estimación de la fijación de carbono atmosférico en la biomasa forestal de las microcuencas.....	199
5.4.4.1.1.	Cálculo de la biomasa.....	199
5.4.4.1.2.	Cálculo del carbono forestal.....	200
5.4.4.2	Determinación del modelo basado en redes neuronales artificiales aplicado a la fijación de carbono atmosférico.....	201

<b>Capítulo VI</b>	<b>APLICACIÓN DE LA METODOLOGIA CENTRADA EN LA FIJACION DE CARBONO</b>	<b>207</b>
6.1.	EXTRACCIÓN	211
6.1.1.	Situación inicial de las microcuencas en la etapa de preintervención	211
6.1.2.	Perfil objetivo de restauración	214
6.2.	ANÁLISIS	217
6.2.1.	Problemática	217
6.2.2.	Alternativas de solución	218
6.2.3.	Criterios de evaluación y selección	220
6.2.4.	Tabulación de alternativa óptima	222
6.2.5.	Modelo de requerimientos	225
6.3.	ESPECIFICACIÓN	228
6.3.1.	Diseño de estrategias	228
6.3.1.1.	Dispositivos de restauración	228
6.3.1.2.	Diseño lógico	237
6.3.1.3.	Levantamiento del layout físico	241
6.3.2.	Formulación del diseño	243
6.3.2.1.	Análisis funcional de los dispositivos	243
6.3.2.2.	Protocolos de implementación	251
<b>Capítulo VII</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>267</b>
7.1.	DESCRIPCIÓN DE LA SITUACIÓN ACTUAL DE LAS MICROCUENCAS	270
7.1.1.	Descripción de las microcuencas en la etapa posintervención	270
7.1.1.1.	Microcuenca 1	270
7.1.1.2.	Microcuenca 2	274
7.1.1.3.	Microcuenca 3	279
7.1.1.4.	Microcuenca 4	283
7.1.2.	Análisis morfométrico de las microcuencas	286
7.1.3.	Cuantificación de los impactos ambientales en las microcuencas de alto Loica	294
7.2.	DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS INTEGRAL DE SUELOS	298
7.2.1.	Análisis químico	299
7.2.1.1.	Caracterización de los puntos de muestra	300
7.2.1.2.	Análisis de la composición química del suelo	305
7.2.2.	Análisis físico	319
7.2.2.1.	Análisis de suelos por transectos	319
7.2.2.2.	Análisis de calicatas	325
7.2.2.2.1.	Microcuenca 1	326
7.2.2.2.2.	Microcuenca 2	332
7.2.2.2.3.	Microcuenca 3	338
7.2.2.2.4.	Microcuenca 4	344
7.2.3.	Análisis hidrológico	352
7.2.4.	Análisis biológico	363
7.2.4.1.	Bacterias	363
7.2.4.2.	Hongos	369

7.3.	MODELACION ANALITICA EMPIRICA DE ZANJAS DE INFILTRACION.....	376
7.3.1.	Modelación DENL-BB para Zanjás de Infiltración.....	376
7.3.1.1.	Introducción.....	376
7.3.1.2.	Especificación de variables explícitas e implícitas de la modelación.....	377
7.3.2.	Modelo dinámico NL de altura de nivel de zanja.....	377
7.3.3.	Modelo dinámico NL de flujos de salida de zanja.....	378
7.3.4.	Modelo dinámico linealizado de flujo salida de zanja.....	378
7.3.5.	Modelo dinámico linealizado de altura de nivel de zanja.....	379
7.3.6.	Modelo dinámico de flujos para un sistema de n Zanjás de Infiltración en Modalidad escalera.....	379
7.3.6.1.	Antecedentes.....	379
7.3.6.2.	Modelo dinámico de flujos salida Zanja1 para sistema $Z^{n=3}$ .....	380
7.3.6.3.	Modelo dinámico de flujos salida Zanja2 para sistema $Z^{n=3}$ .....	381
7.3.6.4.	Modelo dinámico de flujos salida Zanja2 para sistema $Z^{n=3}$ .....	381
7.3.6.5.	Modelo Dinámico de Variables de Estado (MVE) aplicado a Sistemas de Zanjás de Infiltración.....	383
7.3.6.6.	Modelo dinámico en Variables de Estado de Laplace (MVEs) aplicado a Sistema de Zanjás.....	385
7.3.6.7.	Solución MVEt usando transformada inversa $L^{-1}\{MVEs\}$ .....	385
7.3.7.	Acondicionamientos estructurales y de variables de diseño para Desarrollo de Modelos.....	387
7.4.	FORMULACION DEL MODELO DE REDES NEURONALES ARTIFICIALES...	391
7.4.1.	Análisis y orden de datos.....	391
7.4.2.	Conjunto de entrenamiento, validación y testeo.....	393
7.4.3.	Método Clúster Matlab.....	394
7.4.3.1.	Características de la red Clúster.....	394
7.4.3.2.	Entrenamiento.....	395
7.4.3.3.	Resultados.....	396
7.4.4.	Método Red Backpropagation Matlab.....	398
7.4.4.1.	Características de la Red Backpropagation.....	398
7.4.4.2.	Entrenamiento.....	399
7.4.4.3.	Resultados.....	399
7.4.5.	Método Red Base Radial Matlab.....	401
7.4.5.1.	Características de la Red de Base Radial.....	402
7.4.5.2.	Entrenamiento.....	402
7.4.5.3.	Resultados.....	403
7.4.6.	Análisis global.....	405
7.4.7.	Prueba del modelo para cambio de la variable suelo.....	407
<b>Capítulo VIII DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....</b>		<b>411</b>
8.1.	DISCUSIÓN.....	414
8.1.1.	Ingeniería de requerimientos.....	414
8.1.2.	Evaluación del modelo y levantamiento de resultados.....	416
8.1.2.1.	Situación actual de las microcuencas.....	416
8.1.2.2.	Análisis de suelo.....	420
8.1.2.3.	Modelación analítica empírica de zanjás de infiltración.....	423
8.1.2.4.	Modelo de red neuronal.....	423

8.2.	CONCLUSIONES.....	424
8.3.	APLICACIONES PRÁCTICAS.....	427
8.4.	INVESTIGACIONES FUTURAS.....	430
	<b>BIBLIOGRAFIA GENERAL.....</b>	<b>433</b>
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>445</b>
Anexo 1.	Series de suelos predominantes en San Pedro de Melipilla.....	447
Anexo 2.	Precipitaciones en Alto Loica.....	453
Anexo 3.	Determinación del recurso paisaje.....	455
Anexo 4.	Determinación del volumen de poros.....	461
Anexo 5.	Parámetros de análisis de calicatas.....	462
Anexo 6.	Obras de restauración hidrológica forestal implementadas en las microcuencas de trabajo.....	472

## RESUMEN

La erosión es el principal problema que afecta a los suelos en Chile, lo cual, conlleva a que éste pierda paulatinamente su capacidad para generar bienes y servicios con consecuencias económicas y sociales para los gobiernos locales. Por ello, la Corporación nacional forestal (CONAF) solicitó cooperación técnica al gobierno de Japonés a través de la “Agencia de cooperación internacional de Japón” (JICA) en 1993.

Producto de dicha cooperación fue el desarrollo del proyecto “Restauración de cuencas hidrográficas en la zona semiárida de Chile”, implementado en la comuna de San Pedro de Melipilla en la región metropolitana en la zona central de Chile. La proyección de la investigación tenía como fin la transferencia tecnológica a pequeños y medianos propietarios, además de implementar dicho proyecto en otras zonas del país fuertemente azotadas por la erosión.

En el marco de este proyecto se llevó a cabo esta investigación, cuyo perfil está enfocado en los servicios ambientales proponiendo un modelo de restauración centrado en la fijación de carbono atmosférico considerando que el número y diversidad de las obras de restauración es directamente proporcional al carbono fijado en las microcuencas considerando que estas contribuyen significativamente al crecimiento de la biomasa vegetal.

El sitio de trabajo fue el sector de Alto Loica en la comuna de San Pedro de Melipilla; el lugar está situado en la Cordillera de la Costa a un altitud media de 300 msnm, geográficamente es un sector accidentado donde predominan las quebradas y la erosión es el principal problema en los suelos. La propuesta metodología se basó en la “Ingeniería de requerimientos” considerando 4 aspectos básicos en forma secuencial y consecutiva: extracción, análisis, especificación y evaluación. Inicialmente se determinó la situación inicial de las microcuencas antes de la instalación del proyecto con el fin de efectuar un análisis comparativo de 20 años; en segundo lugar se determinó el problema a solucionar así como la formulación del modelo de requerimientos; en tercer lugar se definieron los dispositivos así como los estándares y medidas de aplicación y finalmente se evaluó el modelo en función de cuatro resultados básicos: análisis de la situación actual de las microcuencas, análisis integral de suelos, formulación del modelo integro diferencial de las obras de restauración (específicamente zanjas de infiltración) y formulación del modelo de fijación de carbono basado en redes neuronales artificiales.

Los resultados indicaron que existe un aumento de la biomasa vegetal en zonas donde se implementaron las obras de restauración cambiando significativamente el paisaje del entorno. La comparación mapas entre los años 1990 (antes del proyecto) y 2010 muestran un aumento cualitativo de la biomasa, además los valores del NDVI muestran un aumento sostenido en las microcuencas 1, 2 y 3 (por ejemplo, muestra un aumento de 0,06 en el año 1990 a 0,22 en el año 2010 en la microcuenca 2), lo que implica un aumento tanto en la extensión como en la vigorosidad de la vegetación en las microcuencas de trabajo.

El análisis de suelos demostró que son suelos de carácter forestal de naturaleza granítica que son comunes en la zona central de Chile, donde predominan los suelos delgados y de textura franco arenosa y arenas francas, con una densidad aparente que fluctúa en los 1,40 gr/cc y una densidad real que oscila alrededor de 2,80 gr/cc.



Se formuló además un modelo integro–diferencial que explica el funcionamiento de las zanjas de infiltración, contrario a los modelos lineales existentes.

Finalmente la formulación del modelo de fijación de carbono determinó que el agua es el factor más importante para el desarrollo de la biomasa arbórea; siendo determinante la presencia de la obra de restauración, en este caso, el modelo indicó que la obra presente (zanja de infiltración) es determinante para la fijación de carbono atmosférico debido a un aumento de la biomasa arbórea cuando la obra está presente; los eucaliptus con zanjas alcanzan un altura promedio de 14 metros, mientras que eucaliptus localizados en sectores sin obras alcanzan en promedio 8 metros.

La formulación de esta metodología puede ser extrapolada y aplicada a diferentes escenarios futuros en la zona semiárida de Chile para restaurar suelos erosionados. Además, los análisis microbiológicos infieren que las costras biológicas pueden constituirse en una herramienta eficaz que en conjunto con la reforestación puede utilizarse para disminuir la superficie erosionada.

## ABSTRACT

Erosion is the main problem affecting soil in Chile, which implies its progressive loss in its ability to generate goods and services, implying economic and social consequences for the local administrations. Due to that, the National Forest Corporation (CONAF) asked the Japanese Government for technical cooperation through the Japanese International Cooperation Agency (JICA) in 1993.

A result of that cooperation was the project 'Restoration of Hydrographic Basins in the semi-arid areas of Chile', implemented in the area of San Pedro de Melipilla, in the Metropolitan Region in the Central area of Chile. The projection of the investigation had as aim the technological transference to small and medium-sized land owners, apart from implementing this project in other areas of the country, strongly affected by erosion.

This investigation was carried out within the framework of this project, and its profile is focused on environmental services, proposing a restoration model aiming at the fixation of atmospheric carbon, considering that the number and diversity of the restoration work is proportional to the carbon fixed in the micro basins, taking into account that these contribute significantly to the growth of vegetable biomass.

The working place is located in the area of Alto Loica, in the area of San Pedro de Melipilla; the place is located in the coast ridge, at an average height of 300 meters above sea level. Geographically talking, it is an abrupt area, with a predominance of brooks, being erosion the main soil problem. The methodological proposal was based on 'requirement engineering', considering four basic aspects in a sequential and consecutive way: extraction, analysis, specification and evaluation. The initial situation of the micro basins was first determined before the installation of the project so as to carry out a 20-year comparative analysis; in the second place, the problem to solve was determined, and also the formulation of the requirement model. In third place, devices, standards and application measures were defined; finally, the model was evaluated based on four basic results: analysis of the final situation of the micro basins, integral soil analysis, formulation of the integral differential model for the restoration works, and formulation of the carbon fixation model based on artificial neuronal networks.

Results showed there is an increase of the vegetable biomass in areas where restoration works were implemented, changing significantly the surrounding landscape. Comparative maps between 1990 (before the project) and 2010 show a qualitative growth of the biomass; besides, NDVI values show a continuous growth in micro basins 1, 2 and 3 (for example, a growth from 0.06 in 1990 to a 0.22 in 2010), which implies an increase not only in the extension, but in the strength of vegetation in the target micro basins.

Soil analysis showed that it belonged to forest soils of granitic nature, common in the central area of Chile, with a predominance of thin soils with a sandy loam texture and loam sands, with an apparent density fluctuating between 1.40 gr/cc and a real density oscillating around 2.80 gr/cc.

Besides, and integral differential model was formulated, explaining the functioning of specific works, contrary to the existing lineal models.

Finally, the formulation of the carbon fixation model determined water as the most important factor for the development of the arboreal biomass, being determinant the

presence of the restoration work. In this case, the model showed that the actual work (infiltration ditch) is determinant to allow the atmospheric carbon fixation, allowing an increase of the arboreal biomass growth when the work is present; eucalyptus trees with ditches reach an average height of 14 meters, while eucalyptus trees located in areas without works reach an average height of 8 meters.

The formulation of this methodology can be extrapolated and applied in different future scenarios in the semiarid area of Chile to restore eroded soils; besides, microbiological analyses infer that biological scars can become an efficient tool which, along with reforestation, may be used to diminish eroded surfaces.

## **DECLARACION DE ORIGINALIDADES**

Establecimiento de una metodología basada en la ingeniería de requerimientos (propia de la ingeniería) para la restauración de cuencas hidrográficas.

Proposición de 2 nuevos parámetros morfométricos relativos a la red hídrica de una cuenca.

Formulación de un nuevo modelo matemático heurístico para la cuantificación de los impactos ambientales en una cuenca hidrográfica

Creación de una nueva nomenclatura para la red de causas basada en la clasificación de Horton y el sistema de redes.

Conceptualización y desarrollo de un nuevo modelo matemático dinámico que determine la funcionalidad de un obra de restauración hidrológica forestal

Relacionar las obras de restauración hidrológica forestal con la captura y fijación de carbono atmosférico

## ABREVIATURAS

CAA	: Capacidad de agua aprovechable
CBS	: Costras biológicas del suelo
CC	: Capacidad de campo
CD	: Canal de desviación
CL	: Canal longitudinal
CM	: Caña de maíz
CNR	: Comisión nacional de riego
CTC	: Canal transversal compuesto
CTS	: Canal transversal simple
DG	: Dique de estructuras gavionadas
DOH	: Dirección de obras hidráulicas
DP	: Dique de poste de madera
DS	: Disipadores
EPM	: Estructura de poste de madera
ES	: Esteras de especies
FR	: fajinas de ramas
FS	: fajinas de Sarmiento
GEI	: Gases de efecto invernadero
GPS	: Global position system (Sistema de posicionamiento global)
GT	: Giga tonelada
HA	: Hectárea
HS	: Hidrosiembra
HSPF	: Hydrologic Simulation Program-Fortran (Programa de simulación hidrológica)
MN	: Muro de neumáticos

MO	: Materia orgánica
MOP	: Ministerio de obras publicas
MPM	: Muro de poste de madera
MS	: Malla de sombra
MSNM	: Metros sobre el nivel del mar
MSR	: Muro de sacos rellanos
NDVI	: Normalized difference vegetation index (Índice de vegetación de diferencia normalizada)
NMDS	: Nonmetric Multimensional Scaling (Escala Multidimensional Nométrica)
PCR	: Polymerase Chain Reaction (Reacción en Cadena de la Polimerasa)
PM	: Postes de madera
PMP	: Punto de marchitez permanente
RE	: Ramas de eucaliptus
RFLP	: Restriction fragment length polymorphism (Polimorfismos de longitud de fragmentos de restricción)
RNA	: Redes neuronales artificiales
RV	: Revestimientos de neumáticos
SAG	: Servicio agrícola y ganadero
SIG	: Sistemas de información geográficos
SR	: Sacos rellenos
SWAT	: Soil and Water Assessment Tool (Herramienta de valoración de suelo y agua)
TF	: Terraza forestal
UTM	: Universal Transversal de Mercator
ZI	: Zanjas de infiltración

## INDICE DE FIGURAS

		Pág.
<b>Figura 1.1</b>	Disciplinas implicadas en el estudio integral de las microcuencas hidrográficas	9
<b>Figura 1.2</b>	Procesos ocurridos en el sector de San Pedro de Melipilla	12
<b>Figura 2.1</b>	Propuesta de planificación y gestión ambiental integrada de cuencas hidrográficas, provincia de Chimborazo, Ecuador	30
<b>Figura 2.2</b>	Estrategia general de gestión y manejo de cuencas hidrográficas de la CONAF	33
<b>Figura 3.1</b>	Imagen satelital del sitio de trabajo	60
<b>Figura 3.2</b>	Localizacion de la Región Metropolitana	61
<b>Figura 3.3</b>	Localizacion de la comuna de Melipilla en la Región Metropolitana	62
<b>Figura 3.4</b>	Area de estudio en la comuna de San Pedro de Melipilla	62
<b>Figura 3.5</b>	Mapa geomorfológico de la región Metropolitana	64
<b>Figura 3.6</b>	Serie de suelos del sector San Pedro de Melipilla	65
<b>Figura 3.7</b>	Área de estudio y ubicación de las microcuencas en el sector de Alto Loica	69
<b>Figura 3.8</b>	Esquema con cauces y curvas de nivel de la microcuenca 1	71
<b>Figura 3.9</b>	Mapa de pendientes de la microcuenca 1	72
<b>Figura 3.10</b>	Microcuenca 1	72
<b>Figura 3.11</b>	Esquema con cauces y curvas de nivel de la microcuenca 2	73
<b>Figura 3.12</b>	Mapa de pendientes de la microcuenca 2	74
<b>Figura 3.13</b>	Microcuenca 2 antes del incendio	75
<b>Figura 3.14</b>	Microcuenca 2 después del incendio	76
<b>Figura 3.15</b>	Esquema con cauces y curvas de nivel de la microcuenca 3	77

<b>Figura 3.16</b>	Mapa de pendientes de la microcuenca 3	78
<b>Figura 3.17</b>	Microcuenca 3 antes del incendio	79
<b>Figura 3.18</b>	Microcuenca 3 después del incendio	80
<b>Figura 3.19</b>	Esquema con cauces y curvas de nivel de la microcuenca 4	81
<b>Figura 3.20</b>	Mapa de pendientes de la microcuencas 4	82
<b>Figura 3.21</b>	Microcuenca 4	82
<b>Figura 3.22</b>	Elementos de cuantificación del recurso paisaje	83
<b>Figura 4.1</b>	Cuenca hidrográfica	96
<b>Figura 4.2</b>	Eventos antropicos en una cuenca hidrografica	98
<b>Figura 4.3</b>	Modelo de restauración y alternativas de actuación	104
<b>Figura 4.4</b>	Estructura del suelo	113
<b>Figura 4.5</b>	Diferentes horizontes del suelo	114
<b>Figura 4.6</b>	Relación en tamaño de partículas de arena, limo y arcilla	116
<b>Figura 4.7</b>	Clasificación de suelos según estructura con agregación y sin agregación	117
<b>Figura 4.8</b>	Tetraedros de silicato	119
<b>Figura 4.9</b>	Conformaciones de láminas de silicatos	119
<b>Figura 4.10</b>	Rango de pH de Microorganismos	123
<b>Figura 4.11</b>	El suelo como una caja negra	126
<b>Figura 4.12</b>	Rango de temperatura de crecimiento bacteriano	128
<b>Figura 4.13</b>	Sistema hidrológico global	131
<b>Figura 4.14</b>	La cuenca como sistema hidrológico	132
<b>Figura 4.15</b>	Niveles de aumento en los niveles de CO <sub>2</sub> hasta fines del siglo XX	137
<b>Figura 5.1</b>	Aplicación de la ingeniería de requerimientos	151
<b>Figura 5.2</b>	Marco general de la propuesta metodológica	154



<b>Figura 5.3</b>	Metodología general para la determinación de la situación pos intervención	155
<b>Figura 5.4</b>	Esquematización de la metodología de la fase de análisis	157
<b>Figura 5.5</b>	Esquematización de la metodología de la fase de especificación	158
<b>Figura 5.6</b>	Metodología para la determinación de la situación inicial	159
<b>Figura 5.7</b>	Plantilla básica de Arcgis	160
<b>Figura 5.8</b>	Rango para los valores máximos y mínimos de las variables de PIC <sub>1</sub>	170
<b>Figura 5.9</b>	Estructura general de la metodología para el análisis integral de suelos	172
<b>Figura 5.10</b>	Estructura de la metodología para el análisis químico de suelos	173
<b>Figura 5.11</b>	Formas más comunes de laderas y contornos	176
<b>Figura 5.12</b>	Plantilla básica de SPSS	180
<b>Figura 5.13</b>	Metodología para el análisis físico de suelos	181
<b>Figura 5.14</b>	Bastón pedológico	182
<b>Figura 5.15</b>	Metodología para el análisis hidrológico de suelos	184
<b>Figura 5.16</b>	Metodología para el análisis microbiológico de suelos	192
<b>Figura 5.17</b>	Metodología para la toma de muestras en terreno	193
<b>Figura 5.18</b>	Plantilla del software PRIMER	196
<b>Figura 5.19</b>	Metodología para la determinación del modelo integro-diferencial de las zanjas de infiltración	197
<b>Figura 5.20</b>	Metodología para la determinación del carbono capturado y secuencia lógica para la creación de la red neuronal	198
<b>Figura 5.21</b>	Método de medición del DAT y el DAP	199
<b>Figura 5.22</b>	Modelo genérico de una neurona artificial	202
<b>Figura 5.23</b>	Neurona biológica y neurona artificial	202
<b>Figura 5.24</b>	Clasificación de las redes neuronales	203

<b>Figura 5.25</b>	Planilla básica de matlab	204
<b>Figura 5.26</b>	Esquema de una red neuronal	204
<b>Figura 6.1</b>	NDVI de la microcuenca 1, año 1990	211
<b>Figura 6.2</b>	NDVI de la microcuenca 2, año 1990	212
<b>Figura 6.3</b>	NDVI de la microcuenca 3, año 1990	212
<b>Figura 6.4</b>	NDVI de la microcuenca 4, año 1990	213
<b>Figura 6.5</b>	Diferentes planes según objetivo final	214
<b>Figura 6.6</b>	Jerarquía de niveles de la gestión en cuencas	215
<b>Figura 6.7</b>	Localización del perfil objetivo en investigaciones de transformación de un espacio degradado	216
<b>Figura 6.8</b>	Problemática de los suelos en las microcuencas de Alto Loica	218
<b>Figura 6.9</b>	Trayectoria en el tiempo según enfoque del tratamiento	220
<b>Figura 6.10</b>	Criterios de evaluación y selección en función de los logros y alcance de la solución	221
<b>Figura 6.11</b>	Modelo de caso de usos para las obras de Alto Loica	225
<b>Figura 6.12</b>	Modelo de requerimientos de Alto Loica	227
<b>Figura 6.13</b>	Clasificación de obras de restauración en relación a su función	228
<b>Figura 6.14</b>	Zanjas de infiltración en la microcuenca 2	230
<b>Figura 6.15</b>	Canal de desviación en la microcuenca 2	231
<b>Figura 6.16</b>	Dique de poste en la microcuenca 3	232
<b>Figura 6.17</b>	Estructura gavionada en la microcuenca 2	232
<b>Figura 6.18</b>	Vista frontal de muro de poste de madera en la microcuenca 3	233
<b>Figura 6.19</b>	Muro de sacos rellenos en la microcuenca 2	234
<b>Figura 6.20</b>	Terraza forestal implementada en la microcuenca 2	234
<b>Figura 6.21</b>	Tratamiento lineal de sacos en la microcuenca 3	235

<b>Figura 6.22</b>	Estructura de poste de madera en la microcuenca 2	236
<b>Figura 6.23</b>	Canal longitudinal de sacos de tierra en la microcuenca 2	236
<b>Figura 6.24</b>	Biotecnias en la microcuenca 2	237
<b>Figura 6.25</b>	Modelo interconectado unilineal de las obras de restauración hidrológico–forestal en la microcuenca 1	238
<b>Figura 6.26</b>	Modelo interconectado unilineal de las obras de restauración hidrológico–forestal en la microcuenca 2	239
<b>Figura 6.27</b>	Modelo interconectado unilineal de las obras de restauración hidrológico–forestal en la microcuenca 3	240
<b>Figura 6.28</b>	Esquema de zanjas de infiltración con corrientes de entrada y salida	244
<b>Figura 6.29</b>	Modelo de cajas del sistema de zanjas de infiltración	245
<b>Figura 6.30</b>	Esquema de diques con corrientes de entrada y salida	247
<b>Figura 6.31</b>	Modelo de cajas de sistema de diques	248
<b>Figura 6.32</b>	Esquema de estructura gavionada	249
<b>Figura 6.33</b>	Modelo de cajas de sistema de “Diques de estructura gavionada	250
<b>Figura 6.34</b>	Perfil de diseño de la zanja de infiltración	253
<b>Figura 6.35</b>	Perfil de diseño del canal de desviación	254
<b>Figura 6.36</b>	Perfil de diseño de dique de postes	255
<b>Figura 6.37</b>	Diseño de estructuras gavionadas	257
<b>Figura 6.38</b>	Diseño de muro de poste de madera	259
<b>Figura 6.39</b>	Vista perfil y frontal muro de sacos como estabilizador de flujos hídricos	260
<b>Figura 6.40</b>	Vista perfil y frontal muro de sacos como amortiguador de impactos laterales	261
<b>Figura 6.41</b>	Vista lateral de una terraza manual	262
<b>Figura 6.42</b>	Layout físico de las obras de restauración hidrológico – forestal de la microcuenca 1	264

<b>Figura 6.43</b>	Layout físico de las obras de restauración hidrológico – forestal de la microcuenca 2	265
<b>Figura 6.44</b>	Layout físico de las obras de restauración hidrológico – forestal de la microcuenca 3	266
<b>Figura 7.1</b>	NDVI de la microcuenca 1, año 1995	270
<b>Figura 7.2</b>	NDVI de la microcuenca 1, año 2000	271
<b>Figura 7.3</b>	NDVI de la microcuenca 1, año 2005	271
<b>Figura 7.4</b>	NDVI de la microcuenca 1, año 2010	272
<b>Figura 7.5</b>	Cuantificación del factor NDVI para la microcuenca 1	272
<b>Figura 7.6</b>	Estado de la microcuenca 1 año 2010	273
<b>Figura 7.7</b>	Pino piñonero ( <i>Pinus pinea</i> )	273
<b>Figura 7.8</b>	Ciprés de Arizona ( <i>Cupressus arizonica</i> )	274
<b>Figura 7.9</b>	NDVI de la microcuenca 2, año 1995	275
<b>Figura 7.10</b>	NDVI de la microcuenca 2, año 2000	275
<b>Figura 7.11</b>	NDVI de la microcuenca 2, año 2005	276
<b>Figura 7.12</b>	NDVI de la microcuenca 2, año 2010	276
<b>Figura 7.13</b>	Cuantificación del factor NDVI para la microcuenca 2	277
<b>Figura 7.14</b>	Estado de la microcuenca 2 año 2010	277
<b>Figura 7.15</b>	Espino ( <i>Acacia cavens</i> )	278
<b>Figura 7.16</b>	Eucalipto común ( <i>Eucalyptus cameldulensis</i> )	278
<b>Figura 7.17</b>	NDVI de la microcuenca 3, año 1995	279
<b>Figura 7.18</b>	NDVI de la microcuenca 3, año 2000	280
<b>Figura 7.19</b>	NDVI de la microcuenca 3, año 2005	280
<b>Figura 7.20</b>	NDVI de la microcuenca 3, año 2010	281
<b>Figura 7.21</b>	Cuantificación del factor NDVI para la microcuenca 3	281
<b>Figura 7.22</b>	Estado de la microcuenca 3 año 2010	282
<b>Figura 7.23</b>	Boldo ( <i>Peumus boldus</i> )	282

<b>Figura 7.24</b>	NDVI de la microcuenca 4, año 1995	283
<b>Figura 7.25</b>	NDVI de la microcuenca 4, año 2000	284
<b>Figura 7.26</b>	NDVI de la microcuenca 4, año 2005	284
<b>Figura 7.27</b>	NDVI de la microcuenca 4, año 2010	285
<b>Figura 7.28</b>	Cuantificación del factor NDVI para la microcuenca 4	285
<b>Figura 7.29</b>	Curva hipsométrica microcuenca 1	288
<b>Figura 7.30</b>	Curva hipsométrica microcuenca 2	289
<b>Figura 7.31</b>	Curva hipsométrica microcuenca 3	290
<b>Figura 7.32</b>	Curva hipsométrica microcuenca 4	291
<b>Figura 7.33</b>	Aspectos a evaluar en las microcuencas	294
<b>Figura 7.34</b>	Relación entre las dimensiones que componen la morfofuncionalidad del suelo	298
<b>Figura 7.35</b>	Grid de puntos de muestreo	300
<b>Figura 7.36</b>	Variación del pH en los distintos horizontes	308
<b>Figura 7.37</b>	Relación entre la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y el pH	309
<b>Figura 7.38</b>	Variación de la capacidad de intercambio catiónico en los distintos horizontes	310
<b>Figura 7.39</b>	Variación del Nitrógeno en los distintos horizontes	311
<b>Figura 7.40</b>	Variación del Fósforo en los distintos horizontes	312
<b>Figura 7.41</b>	Variación del Potasio en los distintos horizontes	313
<b>Figura 7.42</b>	Mapa de profundidad de suelos de la microcuenca 1	320
<b>Figura 7.43</b>	Mapa de profundidad de suelos de la microcuenca 2	321
<b>Figura 7.44</b>	Mapa de profundidad de suelos de la microcuenca 3	322
<b>Figura 7.45</b>	Mapa de profundidad de suelos de la microcuenca 4	323
<b>Figura 7.46</b>	Superficie en hectáreas en función de la profundidad de suelos por estrato	324
<b>Figura 7.47</b>	Perfil longitudinal del cauce principal de la microcuenca 1	354

<b>Figura 7.48</b>	Diseño logico del sistema de drenaje de la microcuencia 1	354
<b>Figura 7.49</b>	Cauce principal de la microcuencas 1	355
<b>Figura 7.50</b>	Perfil longitudinal del cauce principal de la microcuencia 2	356
<b>Figura 7.51</b>	Diseño logico del sistema de drenaje de la microcuencia 2	356
<b>Figura 7.52</b>	Cauce principal de la microcuencas 2	357
<b>Figura 7.53</b>	Perfil longitudinal del cauce principal de la microcuencia 3	358
<b>Figura 7.54</b>	Diseño logico del sistema de drenaje de la microcuencia 3	358
<b>Figura 7.55</b>	Cauce principal de la microcuencia 3	359
<b>Figura 7.56</b>	Perfil longitudinal del cauce principal de la microcuencia 4	360
<b>Figura 7.57</b>	Diseño logico del sistema de drenaje de la microcuencia 4	360
<b>Figura 7.58</b>	Cauce principal de la microcuencia 4	361
<b>Figura 7.59</b>	NMDS de bacterias	364
<b>Figura 7.60</b>	Dendograma de las comunidades microbianas de los suelos de Alto Loica	366
<b>Figura 7.61</b>	NMDS de hongos	371
<b>Figura 7.62</b>	Dendograma de las comunidades de hongos de los suelos de Alto Loica	373
<b>Figura 7.63</b>	Representación conceptual simplificada de zanja	376
<b>Figura 7.64</b>	Modelo normalizado de zanja en dominio de Laplace	379
<b>Figura 7.65</b>	Modelo de sistema de zanjas $Z^{n=3}$ .	380
<b>Figura 7.66</b>	Esquema de zanjas de infiltración con corrientes de entrada y salida	389
<b>Figura 7.67</b>	Modelo de cajas del sistema de zanjas de infiltración	390
<b>Figura 7.68</b>	Modelo lógico de los flujos en un sistema de zanjas de infiltración	390
<b>Figura 7.69</b>	Variable infiltración	391
<b>Figura 7.70</b>	Relación infiltración y pendiente	392

<b>Figura 7.71</b>	Grafico de combinaciones de las variables de los modelos	393
<b>Figura 7.72</b>	Esquema de la red clúster	394
<b>Figura 7.73</b>	Tipología de la red clúster	395
<b>Figura 7.74</b>	Resultado de entrenamiento	395
<b>Figura 7.75</b>	Distancias entre las neuronas de salida	396
<b>Figura 7.76</b>	Grafico de resultados red cluster	397
<b>Figura 7.77</b>	Resultados red clúster carbono real y carbono promedio	398
<b>Figura 7.78</b>	Esquema de la red Backpropagation	398
<b>Figura 7.79</b>	Resultado de entrenamiento	399
<b>Figura 7.80</b>	Grafico de resultados de la red Backpropagation	400
<b>Figura 7.81</b>	Resultados de la red Backpropagation con carbono real	401
<b>Figura 7.82</b>	Esquema de la Red de Base Radial	402
<b>Figura 7.83</b>	Entrenamiento de la red Base Radial.	402
<b>Figura 7.84</b>	Gráfico de los resultados de la red Base radial	403
<b>Figura 7.85</b>	Resultados de la red Base Radial con carbono real	404
<b>Figura 7.86</b>	Gráfico de los resultados y errores de los modelos empleados	406
<b>Figura 7.87</b>	Gráfico de combinaciones de las variables del modelo	407
<b>Figura 7.88</b>	Entrenamiento de la red Backpropagation para el cambio de la variable suelo	
<b>Figura 7.89</b>	Referencia y tendencia validación modelo de red neuronal backpropagation.	
<b>Figura 7.90</b>	Validación salidas modelo red neuronal backpropagation de zanjas. Recuperación de carbono	
<b>Figura 7.91</b>	Validación modelo red neuronal backpropagation. Recuperación de carbono en zanjas con suelo=5 y variaciones IN, PE y N°Z en 50 épocas	

## INDICE DE TABLAS

		Pág.
<b>Tabla 2.1</b>	Problemas ambientales asociados al manejo de cuencas hidrográficas de la provincia de Chimborazo en Ecuador	29
<b>Tabla 2.2</b>	Planes nacionales vinculados al manejo de cuencas hidrográficas	35
<b>Tabla 2.3</b>	Principales proyectos y líneas de acción en la gestión de cuencas hidrográficas en Chile	36
<b>Tabla 2.4</b>	Programas de CONAF vinculados al manejo de cuencas hidrográficas	38
<b>Tabla 2.5</b>	Proyectos de manejo de cuencas hidrográficas y de conservación de suelos y aguas llevados a cabo por CONAF	39
<b>Tabla 3.1</b>	Temperaturas en la cuenca de Santiago	66
<b>Tabla 3.2</b>	Caracterización general de las microcuencas de Alto Loica	70
<b>Tabla 3.3</b>	Atributos físicos y estéticos de las microcuencas (MC).	84
<b>Tabla 3.4</b>	Tabla de clasificación de paisajes según intervalos de puntuación	85
<b>Tabla 3.5</b>	Precipitaciones en años con fenómeno del niño	87
<b>Tabla 4.1</b>	Clasificación General de las Cuencas	100
<b>Tabla 4.2</b>	Principales cuencas hidrográficas en Chile	102
<b>Tabla 4.3</b>	Principales problemas de las cuencas en Chile	102
<b>Tabla 4.4</b>	Principales ordenes de suelos existentes en Chile	111
<b>Tabla 4.5</b>	Horizontes del suelo	113
<b>Tabla 4.6</b>	Clases de pendientes	114
<b>Tabla 4.7</b>	Designación de los suelos según profundidad	115
<b>Tabla 4.8</b>	Clasificación de los suelos según el tipo de fracción granulométrica	117
<b>Tabla 4.9</b>	Tipos de humus según su grado de evolución y sus condiciones de formación	121



<b>Tabla 4.10</b>	Propiedades de distintos elementos en las capacidades del suelo	122
<b>Tabla 4.11</b>	Características del suelo según los rangos de pH	123
<b>Tabla 4.12</b>	Bacterias importantes en el medio ambiente	125
<b>Tabla 4.13</b>	Distribución de bacterias en horizontes de un perfil de un suelo	127
<b>Tabla 4.14</b>	Porcentaje de incidencia de bacterias en suelo que requieren y que excretan vitaminas	127
<b>Tabla 4.15</b>	Cantidad estimada de carbono presente en fase solida	135
<b>Tabla 4.16</b>	Depósitos de carbono	136
<b>Tabla 5.1</b>	Rango de longitudes de onda para distintas bandas	161
<b>Tabla 5.2</b>	Parámetros morfométricos de forma	162
<b>Tabla 5.3</b>	Parámetros morfométricos de relieve	164
<b>Tabla 5.4</b>	Parámetros relativos a la red hidrográfica	166
<b>Tabla 5.5</b>	Descripción de los parámetros considerados en el modelo heurístico	168
<b>Tabla 5.6</b>	Cuantificación de los parámetros del modelo	169
<b>Tabla 5.7</b>	Factores y subfactores del modelo	170
<b>Tabla 5.8</b>	Graduación de los valores del parámetro de impacto en cuencas para más de un factor (PIC <sub>3</sub> )	171
<b>Tabla 5.9</b>	Unidades paisajísticas para determinar la posición fisiográfica	175
<b>Tabla 5.10</b>	Cuadro para la determinación de pendiente	176
<b>Tabla 5.11</b>	Pauta para determinar capacidad de uso en suelos de secano	178
<b>Tabla 5.12</b>	Parámetros para el análisis de las calicatas	183
<b>Tabla 5.13</b>	Clases de drenaje externo del suelo	185
<b>Tabla 5.14</b>	Clases de drenaje interno del suelo	186
<b>Tabla 5.15</b>	Parámetros relativos a la hidrología de una cuenca	189

<b>Tabla 5.16</b>	Tabla para determinar la permanencia de un cauce	190
<b>Tabla 5.17</b>	Parámetros para determinar tipo de erosión que afecta al cauce principal	191
<b>Tabla 5.18</b>	Condiciones estándar para un PCR	196
<b>Tabla 6.1</b>	Tratamientos para ecosistemas degradados	219
<b>Tabla 6.2</b>	Puntuación de las características de las alternativas de solución en función de los criterios de selección	223
<b>Tabla 6.3</b>	Clave para la determinación de la alternativa a utilizar según objetivos de la intervención	224
<b>Tabla 6.4</b>	Requerimientos del sistema de restauración de Alto Loica	226
<b>Tabla 6.5</b>	Clasificación de las obras y tratamientos de control de erosión	229
<b>Tabla 6.6</b>	Efecto de la forma y contorno de la ladera en la erosividad y riesgo de deslizamientos	238
<b>Tabla 6.7</b>	Obras de restauración implementadas en las microcuencas de trabajo con la geolocalización respectiva	241
<b>Tabla 6.8</b>	Velocidades de erosión	249
<b>Tabla 6.9</b>	Materiales para la zanja de infiltración	253
<b>Tabla 6.10</b>	Materiales para el canal de desviación	255
<b>Tabla 6.11</b>	Materiales para el dique de postes	256
<b>Tabla 6.12</b>	Materiales para los gaviones	258
<b>Tabla 6.13</b>	Materiales para el Muro de poste de madera	259
<b>Tabla 6.14</b>	Materiales para el muro de sacos rellenos	261
<b>Tabla 6.15</b>	Requerimientos para la construcción de una terraza forestal	263
<b>Tabla 7.1</b>	Parámetros de forma	286
<b>Tabla 7.2</b>	Cotas y áreas de la microcuenca 1	287
<b>Tabla 7.3</b>	Cotas y áreas de la microcuenca 2	288
<b>Tabla 7.4</b>	Cotas y áreas de la microcuenca 3	298

<b>Tabla 7.5</b>	Cotas y áreas de la microcuenca 4	290
<b>Tabla 7.6</b>	Parámetros de relieve	292
<b>Tabla 7.7</b>	Parámetros relativos a la red hidrográfica	292
<b>Tabla 7.8</b>	Densidad de drenaje y la textura de los materiales en relación con el valor de D	293
<b>Tabla 7.9</b>	Cuantificación de los problemas presentes en las microcuencas antes del incendio	295
<b>Tabla 7.10</b>	Cuantificación de los problemas presentes en las microcuencas después del incendio	297
<b>Tabla 7.11</b>	Elementos cuantificados en los suelos de Alto Loica	299
<b>Tabla 7.12</b>	Caracterización del punto de muestreo de la microcuenca 1	301
<b>Tabla 7.13</b>	Caracterización de los puntos de muestreo de la microcuenca 2	302
<b>Tabla 7.14</b>	Caracterización de los puntos de muestreo de la microcuencas 3 y 4	304
<b>Tabla 7.15</b>	Puntos de muestreo para la determinación del análisis químico de los suelos de Alto Loica	305
<b>Tabla 7.16</b>	Macronutrientes del suelo en las microcuencas de Alto Loica	306
<b>Tabla 7.17</b>	Micronutrientes del suelo en las microcuencas de Alto Loica	307
<b>Tabla 7.18</b>	Análisis estadístico descriptivo de los nutrientes del suelo de Alto loica	314
<b>Tabla 7.19</b>	Análisis estadístico descriptivo de los micronutrientes del suelo de Alto loica	315
<b>Tabla 7.20</b>	Concentración mínima de micronutrientes	316
<b>Tabla 7.21</b>	Efectos de los diferentes niveles de Boro en los suelos	316
<b>Tabla 7.22</b>	Prueba del $X^2$ para la concentración de Boro	317
<b>Tabla 7.23</b>	Análisis estadístico sobre las cantidades mínimas necesarias de cada nutriente para los suelos forestales	318

<b>Tabla 7.24</b>	Valores para medidas de tendencia central de la profundidad de suelos por microcuenca en Alto Loica	325
<b>Tabla 7.25</b>	Características topográficas del sitio de localización de la calicata 1.1	326
<b>Tabla 7.26</b>	Caracterización de los horizontes en la calicata 1.1	327
<b>Tabla 7.27</b>	Aspectos generales de la calicata 1.1	327
<b>Tabla 7.28</b>	Características topográficas del sitio de localización de la calicata 1.2	328
<b>Tabla 7.29</b>	Caracterización de los horizontes en la calicata 1.2	329
<b>Tabla 7.30</b>	Aspectos generales de la calicata 1.2	329
<b>Tabla 7.31</b>	Características topográficas del sitio de localización de la calicata 1.3	330
<b>Tabla 7.32</b>	Caracterización de los horizontes en la calicata 1.3	331
<b>Tabla 7.33</b>	Aspectos generales de la calicata 1.3	331
<b>Tabla 7.34</b>	Características topográficas del sitio de localización de la calicata 2.1	332
<b>Tabla 7.35</b>	Caracterización de los horizontes en la calicata 2.1	333
<b>Tabla 7.36</b>	Aspectos generales de la calicata 2.1	333
<b>Tabla 7.37</b>	Características topográficas del sitio de localización de la calicata 2.2	334
<b>Tabla 7.38</b>	Caracterización de los horizontes en la calicata 2.2	335
<b>Tabla 7.39</b>	Aspectos generales de la calicata 2.2	335
<b>Tabla 7.40</b>	Características topográficas del sitio de localización de la calicata 2.3	336
<b>Tabla 7.41</b>	Caracterización de los horizontes en la calicata 2.3	337
<b>Tabla 7.42</b>	Aspectos generales de la calicata 2.3	337
<b>Tabla 7.43</b>	Características topográficas del sitio de localización de la calicata 3.1	338
<b>Tabla 7.44</b>	Caracterización de los horizontes en la calicata 3.1	339
<b>Tabla 7.45</b>	Aspectos generales de la calicata 3.1	339

<b>Tabla 7.46</b>	Características topográficas del sitio de localización de la calicata 3.2	340
<b>Tabla 7.47</b>	Caracterización de los horizontes en la calicata 3.2	341
<b>Tabla 7.48</b>	Aspectos generales de la calicata 3.2	341
<b>Tabla 7.49</b>	Características topográficas del sitio de localización de la calicata 3.3	342
<b>Tabla 7.50</b>	Caracterización de los horizontes en la calicata 3.3	343
<b>Tabla 7.51</b>	Aspectos generales de la calicata 3.3	343
<b>Tabla 7.52</b>	Características topográficas del sitio de localización de la calicata 4.1	344
<b>Tabla 7.53</b>	Caracterización de los horizontes en la calicata 4.1	345
<b>Tabla 7.54</b>	Aspectos generales de la calicata 4.1	345
<b>Tabla 7.55</b>	Características topográficas del sitio de localización de la calicata 4.2	346
<b>Tabla 7.56</b>	Caracterización de los horizontes en la calicata 4.2	347
<b>Tabla 7.57</b>	Aspectos generales de la calicata 4.2	347
<b>Tabla 7.58</b>	Características topográficas del sitio de localización de la calicata 4.3	348
<b>Tabla 7.59</b>	Caracterización de los horizontes en la calicata 4.3	349
<b>Tabla 7.60</b>	Aspectos generales de la calicata 4.3	349
<b>Tabla 7.61</b>	Parámetros de agua aprovechable en el suelo	352
<b>Tabla 7.62</b>	Matriz de correlación de los factores relativos al agua aprovechable del suelo	352
<b>Tabla 7.63</b>	Parámetros relativos a la red de drenaje en función de los órdenes de cauces	353
<b>Tabla 7.64</b>	Parámetros relativos a los cauces de las microcuencas	362
<b>Tabla 7.65</b>	Matriz de similaridad bacteriana	363
<b>Tabla 7.66</b>	Test global para bacterias.	364
<b>Tabla 7.67</b>	Test de relación para bacterias	365

<b>Tabla 7.68</b>	Porcentajes de similaridad y contribución de cada especie en suelo erosionado	367
<b>Tabla 7.69</b>	Porcentajes de similaridad y contribución de cada especie en suelo con eucaliptus	368
<b>Tabla 7.70</b>	Porcentajes de similaridad y contribución de cada especie en suelo con peumo	368
<b>Tabla 7.71</b>	Matriz de similaridad de hongos	370
<b>Tabla 7.72</b>	Test global para hongos	371
<b>Tabla 7.73</b>	Test de relación para hongos	372
<b>Tabla 7.74</b>	Porcentajes de similaridad y contribución de cada especie en suelo con eucaliptus	374
<b>Tabla 7.75</b>	Porcentajes de similaridad y contribución de cada especie en suelo desnudo	375
<b>Tabla 7.76</b>	Porcentajes de similaridad y contribución de cada especie en suelo con peumo	375
<b>Tabla 7.77</b>	Combinaciones de las variables del modelo	392
<b>Tabla 7.78</b>	Resultados de la red clúster	396
<b>Tabla 7.79</b>	Resultados de la red Backpropagation	400
<b>Tabla 7.80</b>	Resultados de la red Base Radial	403
<b>Tabla 7.81</b>	Resultados y errores de los modelos empleados	405
<b>Tabla 7.82</b>	Cálculo de error considerando resultados de tabla 7.81	406

## PRÓLOGO

Tanto en la antigüedad como en las primeras décadas del siglo XX, existía la concepción que los recursos naturales eran casi infinitos y estaban únicamente para uso exclusivo del ser humano. Durante la época colonial, este paradigma llevó a grandes catástrofes ecológicas en Chile, como por ejemplo, la deforestación de la Pampa del Tamarugal con fines agrícolas, ganaderos, industriales y metalúrgicos. A fines del siglo XIX el inicio de la colonización alemana en el sur del país llevó a quemar miles de hectáreas para instaurar asentamientos humanos creando incendios que duraron años<sup>1</sup>. Sin embargo, científicos como Federico Albert (a fines del siglo XIX) visualizaron los problemas existentes creando las primeras líneas de acción concernientes al cuidado de la flora y fauna del país. Fruto de esto fue la primera ley de bosques promulgada bajo la presidencia de Don Carlos Ibáñez del Campo en 1931. Los cambios que ocurrieron posteriormente (sobre todo en la década de los 60) crearon una nueva concienciación respecto al tema que en Chile se hizo evidente con la sequía de 1965 y que hizo que las autoridades de la época comenzaran a evaluar en forma más patente el tema ambiental. En 1974, se crea la Corporación Nacional Forestal (CONAF)<sup>2</sup>, cuyo fin era el cuidado y mantención de los parques, reservas y monumentos naturales, la fiscalización forestal y la concreción de planes de reforestación en todo el territorio nacional. A pesar de los esfuerzos que dicha institución comenzó a realizar desde sus inicios, la sequía (que había hecho estragos la década anterior), la disminución en el promedio de lluvias desde inicios del siglo XX, la excesiva tala en la zona centro y sur del país así como la agricultura intensiva basada en el monocultivo, intensificaron un problema que ya había comenzado a azotar el país desde los inicios del siglo XX y que se extendía casi sin oposición desde la zona norte hacia el sur: la erosión.

Actualmente, en Chile existen aproximadamente –solo entre la cuarta y novena región– 3 millones de hectáreas erosionadas<sup>3</sup>, lo cual, representa un grave problema social, económico y ecológico para el país. El sobrepastoreo, la tala indiscriminada, la agricultura intensiva, los incendios forestales y la disminución de lluvias desde principios del siglo XX contribuyeron a que el suelo perdiera paulatinamente su capacidad de generar bienes y servicios, lo que durante décadas ha afectado a pequeños y medianos propietarios agrícolas y ganaderos de las zonas norte y centro del país, por lo que sucesivos gobiernos han recurrido a la forma jurídica de declarar “zona de catástrofe agrícola” a muchas localidades de Chile para contribuir a minimizar los efectos de las continuas sequías.

Ante esta situación, el Gobierno de Chile decide mejorar el medio ambiente natural de las zonas semiáridas a través del desarrollo de técnicas para el control de la erosión, forestación, y técnicas de reproducción. Todo esto con el fin de mejorar y recuperar la productividad agrícola de dichas áreas. En estas circunstancias, el 29 de octubre de 1991,

---

<sup>1</sup> Transcurridos más de 80 años, todavía es posible ver los daños de estos incendios (algunos de los cuales duraron casi 30 años) en la región de Aysén, en la zona sur de Chile.

<sup>2</sup> Con los años venideros y con una mayor conciencia tanto a nivel gubernamental como social respecto al tema ambiental, se crea en 1992 la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA) y el año 2010 se da inicio a una nueva institucionalidad con la creación del Ministerio del Medio Ambiente

<sup>3</sup> Esto representa el 4,28 % del territorio nacional considerando que Chile tienen un total aproximado de 70 millones de hectáreas

el Gobierno de Chile solicita cooperación técnica al Gobierno de Japón. Este último, en base a la solicitud presentada por medio de la Agencia de Cooperación Internacional de dicho país (JICA), envía en septiembre de 1992, una misión de implementación para intercambiar firmas al registro de discusiones con la parte chilena. De esta forma, se da inicio a las actividades de cooperación técnica del “Proyecto Control de Erosión y Forestación de Cuencas en el Área Semiárida en la República de Chile” en marzo de 1993 hasta junio de 1998, con una duración de un total de 5 años. Posterior a ello, la cooperación se prolonga por 1 año (marzo de 1998 a febrero 1999).

Dicha cooperación se materializó con la creación de una granja modelo con un vivero propio y en la adquisición de 110 hectáreas en el sector de Alto Loica en la comuna de San Pedro de Melipilla en la región metropolitana. El predio fue sectorizado en 4 microcuencas experimentales y en 3 de ellas se hicieron obras de reforestación y restauración de suelos (diques, zanjas de infiltración, muretes, empalizadas, etc.), mientras que una cuarta microcuenca fue dejada como control (o testigo) no efectuándose en ella ningún tratamiento. El monitoreo y control de las obras quedó bajo la supervisión del “Programa de manejo de cuencas hidrográficas en la zona semiárida de Chile” dependiente de la CONAF, cuyos especialistas han trabajado permanentemente en el área estudiando la incidencia de estas obras en la restauración de suelos erosionados. En las microcuencas se han realizado numerosos estudios y visitas de entidades locales e internacionales, además de memorias de pre y postgrado de universidades nacionales y extranjeras.

En la década de los 90, los estudios se centraron en las características forestales y ecológicas (repoblamiento de micromamíferos y aves rapaces) del sector debido al desarrollo de flora arbustiva y disminución de superficie erosionada. Básicamente, la implementación de obras de restauración ecológica – forestal tenía como fin el aumento de la cobertura vegetal y la maximización en la retención de agua tanto para el abastecimiento de la flora del lugar como su incorporación a las napas freáticas. Todo esto además con la finalidad de efectuar una transferencia tecnológica de técnicas de restauración a la población local y a otras zonas del país para recuperar suelos degradados y, de esta forma, contribuir a la disminución de la pobreza rural recuperando ecosistemas degradados para la obtención de bienes y servicios principalmente a los pequeños y medianos propietarios.

En el año 2009 se amplía el campo de investigación planteándose la posibilidad de efectuar un estudio integral que abarcara no solo las propiedades edáficas del suelo sino además, las propiedades hidrológicas y microbiológicas de los suelos restaurados, además de efectuar estudios centrados en los servicios ecosistémicos de la restauración ambiental. Es en el marco de este proyecto donde se ubica el trabajo aquí presentado.

Esto último representó un nuevo campo de investigación, añadiendo la microbiología de suelos como uno de los aspectos a considerar en materia de restauración ambiental. Sin embargo, el fin último del estudio fue determinar la captura de carbono en las microcuencas asumiendo que el crecimiento de flora en el lugar maximiza la captura de carbono atmosférico, por lo que la investigación se centró en los servicios ecosistémicos de las microcuencas en restauración.



---

# CAPITULO I

## INTRODUCCION

---



Durante su desarrollo social, el hombre ha mantenido una constante interacción con la naturaleza, obteniendo con su trabajo los recursos que ésta le brinda para satisfacer sus necesidades de alimento y abrigo; sin embargo, en los dos últimos siglos, producto de la explosión demográfica y los avances científicos y tecnológicos aplicados sin una política de sustentabilidad, el hombre ha venido ejerciendo una creciente presión sobre la naturaleza provocando el deterioro de amplias superficies de terreno (Becerra, 1998).

Cabe destacar que el suelo es vital para el bienestar de sus habitantes por los servicios ambientales que presta. Los bosques proveen recursos maderables y no maderables a las comunidades rurales y provee diversas oportunidades de recreación a los habitantes, riqueza cultural y escenarios paisajísticos (SMA, 2007). El funcionamiento natural de los ecosistemas es fundamental para el mantenimiento del ciclo hidrológico de una cuenca; la vegetación natural regula los escurrimientos superficiales y protege el suelo de la erosión hídrica y eólica.

La deforestación, la erosión del suelo y la escasez de agua potable están entre las diez principales causas que ponen en peligro la vida en el planeta (Wolfensberger, 2006), aun así, el deterioro ambiental confronta a la sociedad con hábitos culturales y cuestionables prácticas socioeconómicas. Esto se visualiza en las políticas de ordenamiento territorial que tiene como uno de sus grandes objetivos la utilización racional de los espacios y recursos, pero, los criterios políticos y economicistas se sobreponen a una mirada sistémica coherente con los lineamientos ambientales que permitan mejorar aún más la relación hombre – entorno. Bajo este paradigma, la búsqueda de una solución objetiva, científicamente fundada, bajo la cual construir las políticas ambientales, rara vez ocurre en la realidad (Quintero, 2005).

La pérdida de bosques termina en la gran mayoría de las veces en erosión, producto de la cual, los suelos desprotegidos de vegetación pierden su capa orgánica por la acción de los vientos y del agua, fenómeno que se acrecienta durante las épocas de lluvia. En cambio, la recuperación de suelos y bosques requiere mucho tiempo, enormes esfuerzos y grandes cantidades de trabajo y capital. Es también importante tener conciencia que la erosión representa una inmensa pérdida de reservas de agua por la carencia de humus en el suelo que absorba y retenga el agua en la capa superior del suelo, la cual, posteriormente infiltra y alimenta las napas subterráneas. Cuanto más alto es el contenido del humus en el suelo, tanto más poroso y rico en nutrientes es y por lo tanto, más agua puede retener para los árboles y la vegetación en general.

La exitosa restauración de suelos erosionados y la reforestación depende en gran medida de la capacidad de absorción y retención de agua, las variables ambientales y los trabajos de restauración.

## 1.1. NOCIONES BASICAS

El deterioro de la tierra o desertificación es el problema ecológico contemporáneo de mayor importancia en los países en desarrollo (Becerra, 1998). Desde hace más de 500 años (desde la explotación de recursos naturales en Latinoamérica durante el periodo colonial) el hombre ha acelerado este proceso, dando lugar a una serie de transformaciones en el medio natural reduciendo el potencial productivo de los suelos, azolvando y contaminando cuerpos de agua, alterando la vegetación y afectando a la salud (Alvarado, 2000). Este proceso ha sido definido como "la disminución o destrucción del potencial biológico de los recursos naturales ocasionado por el mal uso de los mismos, lo que trae como consecuencia procesos degenerativos del medio físico, económico y social de las poblaciones involucradas en su entorno" (Duarte, 1990). Sus principales procesos son la degradación de la cobertura vegetal, la erosión (hídrica y eólica), la acumulación excesiva de sales<sup>4</sup> y la degradación (física, química y biológica), siendo los dos primeros los más importantes (Grimm, et al, 2002). Durante cientos de años, el paradigma productivista fue el parámetro utilizado para el uso irracional de los recursos, sin embargo, en los últimos años la ciencia ha profundizado en los servicios ambientales estableciendo que los ecosistemas naturales proveen un amplio rango de servicios, muchos de los cuales, mantienen la estabilidad global del planeta, pero, en tiempos recientes, las actividades humanas han modificado los ecosistemas generando serios problemas de conservación y alterando seriamente la continuidad de estos servicios (Martínez y Fajardo, 2008)

De acuerdo con estimaciones hechas por la Organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura (FAO), debido a la desertificación cada año dejan de ser productivas de seis a siete millones de ha en el mundo, y a este ritmo, en menos de 200 años el hombre habrá agotado todas las tierras productivas del planeta (Duarte, 1990). La desertificación es provocada principalmente por causas inducidas, las cuales se deben a: (a) falta de concienciación, (b) falta de educación y (c) uso irracional de los recursos naturales, este último por desconocimiento, necesidad y afán de lucro (Becerra, 1998). Para enfatizar sobre la importancia del suelo y de su conservación productiva, cabe mencionar que sus funciones principales son: (a) producción agrícola y forestal, base, entre otras cosas para la obtención de alimentos; (b) reserva genética, componente básico para la estabilidad de los ecosistemas; (c) filtración, amortiguación y transformación de diversas sustancias, lo que confiere al suelo un papel primordial en la lucha contra la contaminación ambiental (Duarte, 1990).

Con estas funciones, es evidente que cualquier situación donde se presente un deterioro acelerado del suelo es incompatible con la sustentabilidad ambiental, y sin ella no puede haber desarrollo sustentable. Por lo tanto, la conservación de suelos, entendida como "el conjunto de medidas para la prevención y control de la erosión o el mantenimiento de la fertilidad del suelo" es un componente básico de dicho desarrollo. (Becerra, 1998)

La unidad natural para organizar adecuadamente las actividades de manejo y controlar los efectos sobre el ambiente lo constituye la cuenca hidrográfica. Esta corresponde a un área delimitada topográficamente, constituida por una red hidrográfica, que vierten a un punto en común (Francke, 1999).

---

<sup>4</sup> Este fenómeno no es nuevo; las malas prácticas de riego en la antigua Mesopotamia generaron la acumulación de sales en el suelo que hicieron insostenible la agricultura, lo cual, terminó en el colapso de muchas ciudades del medio Oriente. (Brailovsky, 2004)

Las actividades agrícolas, ganaderas y forestales generalmente producen efectos negativos sobre los componentes de la cuenca, entre los que destacan suelo, agua, biodiversidad y paisaje, entre otros. Por lo tanto, resulta relevante, que la realización de un manejo integral de la cuenca hidrográfica considere la minimización y mitigación de tales efectos.

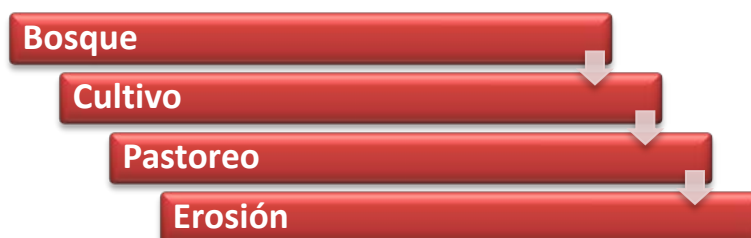
Las principales causas de erosión y sedimentación la constituyen la deforestación de las orillas de los cauces, la cosecha en altas pendientes, madereo a lo largo de la pendiente, la construcción de caminos que modifican el flujo natural de los cursos de agua, caminos con altas pendientes, sistemas de drenaje inadecuados, grandes extensiones de tala rasa, quemas y remoción de la cubierta vegetal original (Fernández, 2004).

## **1.2. ASPECTOS GENERALES**

### **1.2.1. Antecedentes del tema**

En Chile se reconoce a la erosión o cáncer de suelo (desde el punto de vista ambiental y probablemente en términos socioeconómicos) como uno de los problemas ambientales de mayor relevancia a nivel nacional. A fines del siglo XX, la superficie total de suelos erosionados alcanzó una superficie de 34.480.800 ha, lo que equivale a un 46% de los suelos del territorio nacional y cerca del 75% de los suelos productivos de Chile. De la superficie total erosionada, aproximadamente un 80,5% presenta categorías de erosión clasificadas de moderada a muy severa, lo que significa que estos suelos han perdido entre el 40% y el 100% de su profundidad total. (Francke, 1999).

La alteración profunda de las cubiertas vegetales de las cuencas y su sustitución por otras de menor calidad biológica, y de menor nivel de protección, produce alteraciones en los ecosistemas que influyen en los niveles de protección, regulación y control que ejerce la vegetación. El patrón tradicional de la erosión sigue generalmente estos cuatro pasos:



En una cuenca hidrográfica, la vegetación, el agua y el suelo son tres recursos naturales que forman un ciclo en el que el caos natural produce un equilibrio dinámico cuyos elementos estructurales y funcionales están estrechamente relacionados entre sí. La presencia de cada uno y su calidad está condicionada, y a la vez condiciona, la presencia y calidad de los otros dos. La restauración de una cuenca constituye un conjunto de actuaciones que tienen como finalidad controlar y revertir la degradación del suelo ocasionada por la erosión hídrica, deforestación o actividades que han alterado profundamente las cubiertas vegetales permanentes (Francke, 2004)..

Las actuaciones restauradoras van encaminadas a controlar la pérdida de suelo y emisión de sedimentos. La pérdida de suelo se produce por la remoción y transporte de las partículas del suelo cuando los agentes erosivos destruyen los lazos que mantienen unidas dichas partículas en el complejo formado por el suelo. El control del proceso erosivo no será eficaz si no se actúa en todas las zonas de la cuenca<sup>5</sup> con procesos de erosión, especialmente en los terrenos forestales y en los agrícolas de vocación forestal, que es donde frecuentemente se localizan los principales focos de emisión de sedimentos. La pérdida de suelo indica la vulnerabilidad del mismo y la emisión de sedimentos, consecuencia de lo anterior, es un índice de la degradación final de la cuenca. El fenómeno torrencial, que comprende los procesos de transporte y depósito de los sedimentos, puede entenderse como una consecuencia de la relación existente entre la geometría y la geología de la cuenca y los flujos de agua y sedimentos que discurren por la misma, que dependen fundamentalmente de las características de los suelos, la vegetación y sobre todo de las condiciones meteorológicas-climáticas, entre las que destaca la cuantía y régimen e intensidad de las precipitaciones (Mourgues, 1998).

Si a esto se suma la sobreexplotación de recursos, o la disminución enérgica de su calidad, afecta al sistema cuenca como unidad hidrológica y como unidad ecológica. Si se rompe el equilibrio interno dentro del sistema se liberan mecanismos compensatorios de carácter destructivo, como es el caso de la pérdida de suelo por erosión cuando se altera profundamente la vegetación.

Existe una relación estable entre el agua que recibe la cuenca, su vegetación y suelo, y los volúmenes de agua que se movilizan en su interior. Una alteración de este equilibrio activa la presencia de fenómenos de ajuste, que pueden manifestarse tanto mediante procesos de baja intensidad pero ampliamente extendidos en el tiempo, como a través de fenómenos puntuales de alta intensidad (Francke, 1999).

La alteración profunda de las cubiertas vegetales permanentes rompe el equilibrio del sistema cuenca. Para reconstruir el equilibrio se producen fenómenos de reajuste interno del sistema, que libera mecanismos compensatorios. Estos reajustes generan unas consecuencias que, a efectos de la futura restauración de la cuenca, se pueden agrupar en dos tipos, consecuencias biológicas y consecuencias hidrológicas, que a su vez generan unas importantes consecuencias socioeconómicas para la cuenca.

### **1.2.2. Caracterización del trabajo**

Entre las zonas rurales semiáridas de Chile, ubicadas en la zona central del país (entre la IV Región y la Región Metropolitana), la Cordillera de la Costa representa el sector más afectado por la erosión hídrica, constituyendo éste último, el proceso físico de mayor relevancia. De las comunas ubicadas en esta zona, la comuna de San Pedro (provincia de Melipilla, región Metropolitana), presentaba procesos de erosión hídrica calificados de moderados a muy severos, afectando cerca del 69% de la superficie comunal (Fernandez, 2004). Todo esto, se debe al efecto de la indiscriminada tala de vegetación para el

---

<sup>5</sup> En la construcción de la represa de Vajont en Italia en 1960, no se llevaron a cabo estudios de la cuenca completa; estos solo se remitieron específicamente al área intervenida. En 1963, el deslizamiento de las paredes de la cuenca generó una inundación en la cual murieron 2000 personas. Desde ese incidente, el estudio de la cuenca en su totalidad ha sido la constante en intervenciones posteriores en todo el mundo.

consumo de leña<sup>6</sup>, el sobre pastoreo sin control y la deforestación, entre otros factores, originándose que los terrenos pierdan su resistencia a los procesos erosivos y ocurran pérdidas físicas del suelo, causando problemas y disminuciones en la producción silvoagropecuaria agravando con ello los problemas ambientales. De la misma forma, las zonas agrícolas del secano costero (IV – VII Región), se encuentran amenazadas directa o indirectamente por actividades humanas y por la intensa utilización de los recursos naturales. Los árboles autóctonos del secano costero han sido sometidos a una explotación indiscriminada destinándolos principalmente a la producción de leña y carbón, así como también, la extracción de tierra de hoja y el mal manejo de los terrenos agrícolas lo que ha impactado a nivel de la cuenca hidrográfica a través de los procesos de erosión y de sedimentación, entre otros aspectos.

En estas zonas, la introducción y desarrollo de tecnología forestal y la recuperación de suelos degradados constituyen temas prioritarios. La política silvoagropecuaria del Ministerio de Agricultura (Minagri) pone énfasis en evitar la erosión del suelo, el sobrepastoreo, mejorar la agricultura, y lo más importante se refiere a mejorar la calidad de vida de la población rural y prevenir la migración campo-ciudad.

Considerando lo anterior, el presente trabajo se enmarca dentro de los estudios efectuados por el “Programa de manejo de cuencas hidrográficas en la zona semiárida de Chile” (órgano de CONAF), llevados a cabo en la comuna de San Pedro en el sector Alto Loica. El objetivo general del programa es promover el desarrollo sostenible, a través de la conservación y recuperación de suelos y aguas, basado en sistemas de protección y producción integral en microcuencas que presentan un avanzado estado de degradación. Para este objetivo se desarrollan técnicas adecuadas de control de erosión, viverización y forestación, para definir un modelo de transferencia tecnológica, que permita el mejoramiento de la calidad de vida rural, erradicar la pobreza extrema y restaurar la naturaleza degradada. En síntesis, el presente estudio busca proponer un modelo de restauración ambiental centrado en la fijación de carbono, sobre las bases que las obras de restauración permiten restaurar suelos erosionados (bajo parámetros físicos, químicos, hidrológicos y microbiológicos) para el establecimiento de futuros planes de manejo, de tal forma de proponer medidas y acciones técnicas para desarrollar áreas de protección, de suelos en cuencas hidrográficas.

El área de proyecto se encuentra afectada por procesos de degradación de suelos y desertificación, es decir, deforestación intensa de las cubiertas del bosque esclerófilos, con presencia de erosión de zanjas y cárcavas, disminución de los rendimientos agrícolas y pobreza rural.

Los trabajos de reforestación y tratamientos ecológicos han demostrado excelentes resultados, con lo cual se infiere que el suelo puede recuperar su potencial para producir bienes y servicios. El objetivo de este trabajo se refiere a analizar como han cambiando las características y propiedades sistémicas de las microcuencas una vez aplicadas las técnicas de restauración ambiental (transcurridos varios años) y las implicancias que esto tiene para los servicios ecosistémicos otorgados por las cuencas y, de esta manera, proponer herramientas que a futuro puedan contribuir al manejo óptimo de recursos<sup>7</sup>.

---

<sup>6</sup> En algunos países de Europa (como España), el hecho de que ya no se tale para consumo de leña se ha convertido en un problema, debido a que la acumulación de biocombustible.

<sup>7</sup> Los servicios ecosistémicos (núcleo de la investigación ) dados por la naturaleza (las microcuencas en este caso), no están solo basados en los elementos estrictamente materiales y transables en el mercado (como

Todo esto basado en la demostración tecnológica en temas de forestación e incorporación de las obras de restauración a actividades de diversa índole que impliquen la restauración de suelos y cuencas.

Las actividades de manejo tienen como objetivo la recuperación y uso racional de los recursos flora, fauna y suelo. Por otra parte, en la actualidad la subcuenca hidrográfica del Estero Yali se encuentra orientada a la producción (agrícola, ganadera, agroindustria y forestal) y la conservación de los recursos naturales a través de la Reserva Nacional El Yali. Desde 1993 el Proyecto Cuencas CONAF/JICA, ha implementado diversas técnicas de recuperación de tierras degradadas. Paralelamente, se han realizado estudios respecto del proceso de pérdida de suelos para evaluar los efectos de las técnicas aplicadas.

### **1.3. INTRODUCCION AL TEMA**

#### **1.3.1. Bases sistémicas del tema**

Los estudios del territorio permanecieron durante mucho tiempo bajo los cánones de la geografía, pero la integración de los eventos que ocurrían en él daba lugar a propiedades demasiadas complejas para ser interpretadas monocientíficamente. Debido a esto la transdisciplinariedad ha sido la herramienta fundamental para la integración de diferentes disciplinas científicas para la explicación de fenómenos naturales complejos.

En el siglo XIX, la geografía distaba mucho del campo epistemológico de las ciencias naturales, pero con el desarrollo de la biogeografía y la ecología del paisaje (con los estudios de Carl Troll), el lenguaje biológico dejó de ser una barrera impenetrable para un geógrafo, especialmente para un neófito. Sin embargo, en nuestros tiempos ya nadie puede estar satisfecho con los hallazgos aislados y desconectados de diferentes disciplinas: es obvio que hace falta establecer eslabones entre ellas y determinar el papel que éstas desempeñan en el mosaico de la totalidad del conocimiento humano (Bondarenko, 2007).

Los fenómenos naturales, por lo tanto, requieren en nuestros tiempos de diferentes aproximaciones epistemológicas, las cuales, dan origen a propiedades emergentes que explican en forma más holística, mecanismos que de otra manera tendrían respuestas reduccionistas si fueran analizadas en forma monodisciplinaria.

Esto último, implica que para los diferentes estudios efectuados en un lugar específico del territorio (microcuencas para este caso), se necesitan diferentes disciplinas y herramientas que en conjunto expliquen ciertos fenómenos o den las bases necesarias para estructurar nociones que sirvan para la toma de decisiones. El estudio aquí presentado implica la aplicación de diferentes ciencias y herramientas.

Lo anterior significa el estudio y aplicación integral de las propiedades sinérgicas que aparecen en los diferentes integrones, por lo cual, la teoría de sistemas aparece como una de las bases holísticas más importantes en el estudio de un análisis territorial. Tras conocer la popularidad en los años 70, la teoría de sistemas aplicada a los mecanismos de gestión desapareció en los años 80, pero ha vuelto a ponerse de moda. A nivel

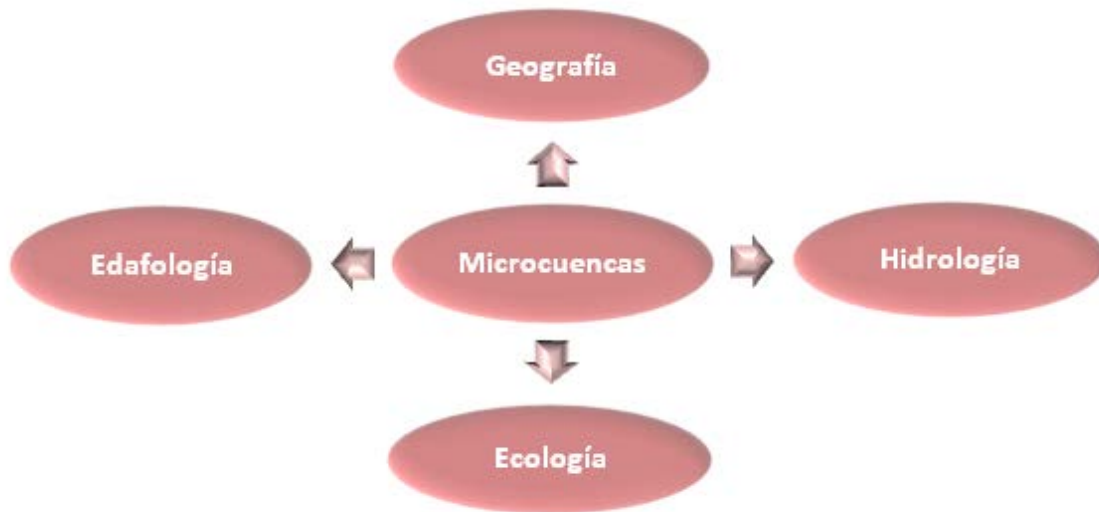
---

recursos naturales típicos), sino más bien, son los elementos que ecológicamente son necesarios para la subsistencia de los organismos superiores como oxígeno, ciclo hidrológico, ciclos biogeoquímicos, homeostasis ambiental, etc....



analítico ésta considera una organización como algo más que la suma de sus partes y pone énfasis en el hecho que sus objetivos y valores no pueden describirse tomando únicamente en consideración sus elementos constituyentes (González, 2002).

Los ecosistemas naturales se caracterizan por ser sistemas altamente complejos, con un alto grado de equilibrio termodinámico<sup>8</sup>. El equilibrio en los flujos de materia y energía (dado por los ciclos biogeoquímicos y la captación de energía por parte de los productores primarios); otorga cierta estabilidad<sup>9</sup>, permitiendo la acción de los atractores para que éstos eviten un aumento de los niveles entrópicos. De esta manera, los “input” y “output” energéticos mantienen estabilizados los eventos y los subsistemas (Audesirk, et al, 1997).



**Figura 1.1. Disciplinas implicadas en el estudio integral de las microcuencas hidrográficas.** Un análisis que implique un estudio integral de cuencas hidrográficas (microcuencas en este caso) necesita de múltiples aproximaciones epistemológicas distintas cuyas fuentes sean disciplinas que trabajen transdisciplinariamente. Fuente: Elaboración propia.

Esto significa que la conexión suelo – vegetación conforma una compleja red de interrelaciones sustentadas por los flujos de energía que ingresan al sistema en forma continua. Los procesos están interconectados de manera sistémica de tal forma que cada proceso o suceso es parte de otro sistema, de la misma forma, el expansionismo propio de los sistemas abiertos indica que todo fenómeno es parte de un fenómeno mayor (Bertalanffy, 1989). La erosión cambia profundamente esta conexión (suelo – vegetación), alterando los ciclos energéticos y con ello, los subsistemas que subyacen en él, motivo

<sup>8</sup> En los ecosistemas naturales basados funcionalmente en la incertidumbre, los procesos se basan en el denominado “sincronismo aleatorio” en el cual el desencadenamiento puntual de ciertos hechos produce la generación de fenómenos específicos, sin embargo el más mínimo cambio en alguno de los eslabones que conforman este proceso conlleva a un fenómeno distinto o de otra intensidad.

<sup>9</sup> Este concepto (estabilidad) no implica que la sumatoria de sus interacciones sea cero (0), sino que constantemente está en movimiento y jamás llega a un estado de equilibrio. Esto significa que los ecosistemas son sistemas cibernéticos con retroalimentación negativa, de lo contrario, [con retroalimentación positiva] el sistema colapsaría. Los mecanismos de ingreso de materia y energía y la entropía generada en él, mantienen el sistema en movimiento con todos los eventos necesarios para mantener sus objetivos y permitir establecimiento de vida animal y vegetal que interactúe a su vez con los elementos abióticos del sistema.

por el cual se genera la desestabilización del entorno traduciéndose como pérdida de suelos y biodiversidad.

Los ecosistemas forman una entramada red de relaciones intra e ínter específicas; en primer lugar generan un “feed – back” en su territorio estructurando una relación de orden vertical con su entorno más inmediato (Di Pace, et al, 2004). Como los paisajes no son replicables, el resultado de ésta relación tendrá características únicas e irrepetibles, lo cual, es reconocido a través de una fase de estabilidad que define su identidad propia, es decir, su originalidad o suma de particularidades. Por esto, en la restauración ambiental, la negentropía adquiere un rol fundamental, ya que, la información es un elemento clave en y para la configuración en el orden y desarrollo de una cuenca.

Esto significa que al fluir la energía en los medios naturales se originará una estabilidad endógena que sustentará los requerimientos elementales encontrados al interior de cada cuenca<sup>10</sup>. Estos mecanismos son: control, estado, complejidad, predicción, regulación, comportamiento y dependencia, que son justamente los elementos a considerar en el manejo y gestión del territorio (Rubio, 1996).

La importancia de la restauración y manejo del sector de una cuenca (sector alto, medio o alto), está en que la relación entre sus componentes dará origen a las estructuras verticales que definirán el paisaje del entorno. A su vez, estas relaciones no solo darán vida a la unión biocenosis – biotopo, sino que, formarán redes con sectores más lejanos formando una compleja y vasta estructura denominada *metabolismo natural extendido*, mediante el cual, una cuenca no sólo establece una relación entre sus componentes, sino también, se relaciona con ecosistemas distantes (Di Pace, et al, 2004).

Esto significa que la intervención en un ecosistema puede generar alteraciones en ecosistemas distantes dando lugar a teleconexiones basadas en la incertidumbre; por ejemplo; las alteraciones en la parte alta de una cuenca generarán alteraciones en la parte baja de esta<sup>11</sup>. Estas relaciones formarán integrones naturales, en los cuales, las sinergias pueden analizarse e integrarse empíricamente en planes de ordenamiento territorial. Además, emergen las estructuras horizontales que permiten la canalización de flujos energéticos con lugares distantes.

Estas estructuras muestran dentro de sí un grupo propio de redes internas, las cuales se fundamentan siempre en una diferenciación primaria entre tipos de interrelaciones y geoelementos. Al someter los suelos de una cuenca a técnicas de restauración, la diferenciación va también asociada a una retroalimentación global de interrelaciones y geoelementos que se transforma en integración del sistema. Los sistemas de retroalimentación<sup>12</sup> estructuran nuevas formas de reconstrucción que pueden ser rechazadas y/o generar relaciones nocivas (como por ejemplo, la reforestación con ciertas especies puede alejar o impedir la instalación de fauna o flora nativa), debido a que esta

---

<sup>10</sup> A nivel de ciencia pura, estos mecanismos están claramente tipificados por la teoría general de sistemas

<sup>11</sup> Los grandes incendios de principios del siglo XX en la zona de Coihaique, erosionaron la zona alta de la cuenca del río Aysén, generando sedimentos que fueron arrastrados por los ríos a las partes bajas de la cuenca. Esto embancó los sectores costeros, motivo por lo cual, el puerto de la ciudad fue trasladado a Puerto Chacabuco donde está actualmente.

<sup>12</sup> En la naturaleza (al igual que los sistemas creados por el hombre como las “ciudades”) el sistema de retroalimentaron básico es negativo, esto porque el sistema de retroalimentación positivo genera la expansión y colapso de los sistemas.

nueva realidad ocupa el nicho que contiene al *todo*. De lo contrario, los flujos energéticos estimulan la estabilidad de esta nueva realidad estructurando el *neotodo* (nuevo escenario surgido después de la restauración), el cual, es dialéctico y explica en forma coherente el alto dinamismo de los ecosistemas y de la naturaleza para formar nuevos escenarios después de ocurrido un evento natural o antrópico (Rubio, 1996).

Es necesario considerar las interrelaciones entre elementos dispares (como el medio ambiente físico, la economía, el bienestar social y la cultura) como herramientas que contribuyan a entregar bases epistemológicas para planes de gestión y manejo de ecosistemas. Una de las ventajas más importantes del enfoque ecológico es que aclara las relaciones entre las decisiones de comportamiento individuales y los contextos en que se producen.

### **1.3.2. Antecedentes del problema**

#### **1.3.2.1. Cambios en los suelos**

Los suelos son sistemas altamente dinámicos, en los cuales se conjugan elementos de distinta índole (físicos, químicos y biológicos), por lo que la degradación de éstos es un fenómeno que es parte de un problema más amplio, la degradación ambiental, que afecta a los tres medios o matrices sobre los que se asienta la biósfera. La degradación de los suelos se define como una disminución de la calidad de los mismos causada por el hombre. Dado que coexisten una degradación natural y una antrópica de los suelos, se reserva el término degradación para la originada por la intervención humana y el de retrogradación para la originada por procesos naturales (Cortés, 2007)

Dos son los tipos de causas principales identificadas como responsables de los problemas de calidad de los suelos:

a) Causas generales –planetarias– ligadas principalmente a la contaminación atmosférica (lluvia ácida, deposiciones secas ácidas);

b) Causas específicas –muy localizadas geográficamente– ligadas a un uso o un manejo no racional de los suelos. Por ejemplo, pastoreo abusivo, prácticas de cultivo inadecuadas, riego con aguas de baja calidad, abandono de tierras de cultivo, transformación de suelo agrícola en urbano o industrial, tala de bosques, construcción de carreteras y grandes obras de ingeniería, depósito de residuos en su superficie o en su interior, etc.

La degradación de los suelos no es un proceso reciente. En el sur de Grecia en la región de la Argólida situada al NE de la península del Peloponeso, los descubrimientos arqueológicos apuntan a que hace ya 7.000 años, el cultivo en suelos de baja productividad tuvo unas consecuencias que se perciben aún en la actualidad en forma notoria. El mismo tipo de evidencias arqueológicas señalan a los procesos de degradación de suelos como factor determinante en la extinción de muchas culturas del medio oriente, las cuales, basaban su economía y su productividad en sus obras hidráulicas; pero, las malas prácticas de manejo de suelos acabaron con muchas ciudades semíticas; fenómenos similares ocurrieron en la civilización Harapan en el Oeste de la India y en la cultura maya en Centro América (Brailovsky, 2004). En Chile, ocurrieron fenómenos similares en la zona norte con la sobreexplotación del tamarugal y en el sur, la colonización alemana a fines del siglo XIX y principios del XX, acabó con cientos de

hectáreas de bosque nativo debido a quemas indiscriminadas y a la inexistencia de planes de manejo. (Vial, 1981).

Sin embargo, nunca hasta ahora la degradación de los suelos ha tenido un impacto tan grande sobre el medio ambiente. La tasa de degradación de suelos se situó en la primera década del siglo XXI por encima de los  $10^6$  ha / año (Cortés, 2007). La degradación de los suelos sólo se ha percibido como un problema social cuando de ella han derivado efectos sobre los seres vivos y en particular sobre el hombre, o cuando los impactos o daños producidos sobre los suelos eran grandes y de difícil recuperación, debido a la destrucción de la protección natural orgánica que sostiene a la capa superficial de suelo contra la erosión (Bashan, et al, 2000). Por esto, en muchos lugares del mundo se han efectuado numerosos estudios basados en manejos integrales de recuperación y restauración de suelos y cuencas (Adame, 1999)

### 1.3.2.2. Delimitación del problema

Para propósitos de planificación y gestión de recursos naturales, la cuenca hidrográfica se considera una unidad hidrológica, físico-biológica y socio-económica. A través de un plan de estudio integral de suelos se puede conocer el estado, comportamiento y potencialidad de los recursos naturales a nivel de las microcuencas hidrográficas del sector de Alto Loica.



**Figura 1.2. Procesos ocurridos en el sector de San Pedro de Melipilla.** En la comuna, la deforestación y la sobreutilización agrícola y ganadera género un círculo vicioso que llevo a la erosión de los suelos y por consiguiente agotó los recursos existentes, aumentado con ello la pobreza rural del sector. Solo la llegada de empresas externas detuvo (aunque no del todo) el aumento progresivo de la pobreza. Fuente: Elaboración propia.

El sector Alto Loica, comuna de San Pedro de Melipilla en la región metropolitana es la única comuna de esta región que aún es 100 % rural y la más vulnerable<sup>13</sup> de la región

<sup>13</sup> Los parámetros utilizados para caracterizar esta variable fueron: población, pobreza, salud, educación y asistencia social.

metropolitana (Soto y Ulloa, 1997). Sus habitantes son principalmente medianos y pequeños propietarios, herederos de la reforma agraria de fines de los años 60 y principios de los 70. La pobreza rural que caracteriza a sus habitantes hizo que su población hiciera un uso irracional de los recursos arbóreos de la zona por lo que la deforestación excesiva para su uso como combustible y producción de carbón (sumado a una ganadería y agricultura excesiva donde primó el monocultivo) produjo la deforestación de muchas hectáreas, perdiendo con ello el suelo la capa vegetal que lo protegía contra la lluvia y las escorrentías erosionando los suelos de la zona.

La conjunción de factores como la erosión de los suelos, la pobreza rural<sup>14</sup>, la baja variabilidad en los impactos antrópicos<sup>15</sup>, y la cercanía relativa a la zona central de Santiago hicieron que se eligiera esta comuna (y más específicamente el sector de Alto Loica) para la instalación de las obras de restauración hidrológico – forestal. Por este motivo fue el lugar elegido por el convenio CONAF – JICA para la implementación de las obras de restauración ecológica – forestal. Sin embargo, y a pesar de los múltiples trabajos efectuados en el lugar, surgieron preguntas a medida que aumentaban estos últimos. Entre estas estaban:

- ¿Qué características tienen los suelos de Alto Loica?
- ¿Se ha formado horizonte orgánico desde la implementación de las obras de control de erosión?
- ¿Qué cantidad de carbono han fijado las cuencas los últimos 15 años?
- ¿Ha logrado, el proceso de combinación de obras su objetivo final el cual es recuperar y restaurar las microcuencas?
- ¿Qué otras alternativas existen para recuperar la biomasa vegetal de la zona?
- ¿Es posible establecer nuevas metodologías basada en estos últimos puntos para recuperar y restaurar cuencas hidrográficas?
- La microbiología ambiental (específicamente de suelos), ¿Tiene algo que decir con respecto a la restauración ambiental?
- ¿Es posible la conceptualización y desarrollo de nuevos modelos matemáticos que se ajusten a las variables existentes en Alto Loica y que respondan a los fenómenos ecológicos que allí ocurren?

Todas las preguntas anteriores pueden resumirse en la siguiente pregunta que sustenta el desarrollo del trabajo: ¿Pueden las obras de restauración contribuir a la formación de horizonte orgánico en los suelos, además de aumentar la cobertura vegetal maximizando con ello la fijación de carbono? y ¿es posible relacionar las obras de restauración con la cantidad de carbono fijado por la vegetación?

Con el fin de dar respuestas a estas preguntas, el presente estudio se enmarca inicialmente en el análisis (transcurridos más de 15 años de la aplicación del proyecto) de

---

<sup>14</sup> Esto fue clave para la elección del lugar, ya que, el fin era la transferencia tecnológica y el involucramiento de la población. El éxito del proyecto inicial (CONA \_ JICA) implicaba a futuro enseñar a la población local el uso de esta tecnología para ayudar a revertir la situación de degradación de suelos y restaurar zonas erosionadas para que estos, estuvieran en condiciones de producir nuevamente bienes y servicios para la población rural.

<sup>15</sup> Esto implica que los impactos producidos en las microcuencas fueron por tala y uso indiscriminado de recursos pero no por otras acciones como contaminación, embalses, construcciones, etc...

las condiciones físicas, químicas, hidrológicas y microbiológicas del suelo en las microcuencas para determinar ciertas variables que conformen parte de un modelo fenomenológico de restauración ambiental que contribuya a establecer la evolución de las microcuencas y finalmente, relacionar las obras de restauración hidrológicas – forestal con la cantidad de carbono atmosférico capturado por la biomasa, lo cual, conlleva a la proposición de un modelo de ajuste de parámetros que permita estimar la fijación de carbono cuando cambian las variables ecológicas de las microcuencas hidrográficas.

Básicamente, el estudio contempla cuatro niveles de caracterización: el primero, establecer las condiciones de los suelos y la masa vegetacional antes de la aplicación del proyecto (1990) y en la situación actual<sup>16</sup>. En este aspecto del estudio se recopilará y procesará la información, se efectuarán prospecciones de terreno y se hará una evaluación de las propiedades del suelo sometidos a tratamientos de control de erosión. Se generará cartografía de las microcuencas en base a sistemas de posicionamiento y Sistemas de información geográfica, (SIG), de tal forma de planificar y analizar actuaciones para el control, estabilización y recuperación de zonas altamente degradadas. En segundo lugar se persigue un conocimiento general de las propiedades y características de los suelos del sector de Alto Loica en su estado natural. Como todo análisis solo tiene valor cuando va acompañado de una correcta descripción del suelo (Cortés, 2007), los niveles de estudio serán físicos, químicos, microbiológicos e hidrológicos. Los análisis físicos y químicos se efectuarán mediante la recolección de muestras y su posterior análisis en laboratorio, el carácter hidrológico se establecerá analizando el comportamiento de las microcuencas ante los eventos de precipitación. El muestreo de suelo se efectuará en las 4 microcuencas de trabajo para determinar las condiciones físicas y químicas, del suelo, existiendo para ello existe una microcuenca control (sin tratamiento) que servirá para el análisis comparativo. El muestreo y posterior análisis en laboratorio determinará las propiedades microbiológicas del suelo, además de determinar las condiciones biológicas de las microcuencas según el porcentaje y tipo de cobertura vegetal. Tercero, se propondrá un modelo fenomenológico de restauración ambiental basado en la funcionalidad de las obras de restauración ambiental y en cuanto y último lugar, se conceptualizar y desarrollara un modelo para determinar la cantidad de carbono atmosférico capturado por la biomasa vegetal de las microcuencas.

A través del presente estudio se pretende demostrar que los diversos tratamientos de restauración ecológico – ambiental, permiten restaurar un ecosistema con condiciones similares a las que tenía inicialmente. Esto último conforma la base de las propiedades que permiten un análisis global de los servicios ecosistémicos de las microcuencas, medido a través de la maximización de las microcuencas restauradas en la propiedad de fijación de carbono.

---

<sup>16</sup> Respecto de este último punto (situación actual) hay que hacer una salvedad: los días 4 y 5 de febrero de 2012, un incendio forestal de proporciones afectó a 2 de las 4 microcuencas de trabajo en Alto Loica (cabe destacar que el levantamiento de datos necesarios para los primeros objetivos de la tesis ya se habían efectuado), esto implicó la destrucción absoluta del producto de la restauración ambiental (masa vegetal) llevado a cabo por casi 20 años en las microcuencas experimentales por lo que el trabajo contempla solo la restauración llevada a cabo solo hasta el periodo anterior al incendio.

## **1.4. OBJETIVOS E HIPOTESIS**

### **Objetivo General**

Proponer un modelo de restauración ecológico basado en tratamientos de recuperación ambiental aplicados en microcuencas hidrográficas para estimar la fijación de carbono en microcuencas del sector Alto loica, en la subcuenca del Yali en la región de Santiago de Chile.

### **Objetivos Específicos**

Evaluar los efectos de los tratamientos de restauración ambiental en las coberturas vegetacionales y suelos erosionados basados en la evolución de las microcuencas hidrográficas de Alto Loica con y sin obras de restauración hidrológico – forestales.

Realizar una identificación, delimitación y caracterización mediante variables físicas y ambientales de las microcuencas hidrográficas de Alto loica, en función de las bases de datos disponibles, en bases de sistemas informáticos (georreferenciados, redes, grillas.) para la obtención de indicadores de sustentabilidad.

Caracterizar las propiedades físicas, químicas y microbiológicas del suelo y estudiar el comportamiento hidrológico – ambiental de las microcuencas hidrográficas de Alto Loica.

Diseñar un modelo integro – diferencial para estimar el comportamiento de las obras de restauración hidrológico – forestal, específicamente, las zanjas de infiltración.

Proponer un modelo para estimar la fijación de carbono en las microcuencas hidrográficas del sector Alto Loica.

### **Hipótesis**

La implementación de obras de restauración ambiental aplicadas según un diseño estructurado en función de las características físicas, topográficas y ecológicas en áreas con suelos erosionados contribuyen al aumento de la cobertura vegetal y a la disminución de la superficie erosionada cambiando positivamente las condiciones ecológicas en cuencas hidrográficas contribuyendo a la recuperación, reforestación y restauración de estas últimas, maximizando con ello la fijación de carbono atmosférico.

## **1.5. ORGANIZACIÓN DE LA TESIS**

Como se mencionó en apartados anteriores, el trabajo aquí presentado significó una nueva línea de investigación sobre la base de los estudios llevadas a cabo los últimos 15 años por CONAF: análisis integral de los cambios ocurridos en los suelos producto de la restauración ambiental. Esto significó la incorporación de nuevas metodologías y reestructuración de los paradigmas con los cuales se venía trabajando desde los inicios del convenio CONAF – JICA, debido principalmente a la multidisciplinariedad de orden ingenieril con la cual se abordó el trabajo.

La estructura de la presente tesis sigue un planteamiento de tipo secuencial y cronológico. La memoria de la tesis se estructura en diez capítulos; cada uno de los cuales lleva incluidos una introducción, desarrollo del tema y discusión.

El capítulo uno, plantea los antecedentes generales del trabajo. Detalla la importancia de las cuencas y porque es necesaria su restauración (principalmente por los servicios ecosistémicos que genera y la importancia estratégica por ser fuente captadora de agua y recursos naturales). La caracterización del trabajo, así como el problema a investigar, se detallan en los primeros puntos de este capítulo. Pero además, se explican los fundamentos holísticos que sustentan este tipo de trabajo, básicamente los elementos sinérgicos que conllevan a investigar los elementos que conforman una cuenca hidrográfica. Finalmente se detallan los antecedentes, delimitación del problema, hipótesis y los objetivos del trabajo.

El capítulo dos trata sobre el estado del arte; básicamente se investiga cual es el conocimiento que existe en relación al tema y como los tópicos han sido tocados por otras investigaciones tanto a nivel nacional como internacional. Principalmente se aboca a dos grandes apartados: gestión en cuencas hidrográficas e investigaciones efectuadas en Chile y en el extranjero sobre la fijación y determinación de stock de carbono. Respecto del primer punto se analiza la situación existente en la actualidad sobre la gestión de cuencas en el mundo y en Chile. Básicamente se determina el nivel de conocimiento existente en torno al tema, cuales son las investigaciones más comunes y cuál es el eje rector o idea fuerza de la gestión en Chile. Respecto de las metodologías y trabajos para la determinación de carbono se investigaron los principales antecedentes efectuados en el mundo y las investigaciones llevadas a cabo en Chile.

El capítulo tres trata sobre el sujeto de estudio, explicándose las características del emplazamiento que se va a analizar, siendo estas principalmente geográficas – administrativas – ecológicas. El lugar elegido para la aplicación del modelo es el sector de Alto Loica en San Pedro de Melipilla en la región metropolitana. Determinar las características del área es esencial para el establecimiento de las pautas que forman parte de la metodología, por ello, este capítulo trata sobre sus características geográficas, administrativas, vegetacionales y geomorfológicas, además de la orografía del lugar tipo de suelo y clima. Debido al incendio que atacó a las microcuencas se hará mención al lugar antes del incendio y después de este.

Los antecedentes teóricos que sustentan el estudio se contemplan en el capítulo 4. El marco teórico abarca aspectos tales como cuencas hidrográficas y características del suelo (físicas, químicas, hidrológicas y biológicas). Estos conceptos serán la base sobre lo cual se trabajará, por lo tanto estipulan y delimitan el área de estudio dentro del campo del conocimiento de las ciencias ambientales.

El capítulo 5 trata sobre la propuesta metodológica. La metodología utilizada está basada en la ingeniería de requerimientos, por lo que contempla 4 grandes pasos: extracción, análisis, especificación y evaluación. Básicamente estos pasos están apuntados a las obras de restauración empleadas en las microcuencas de trabajo, siendo el último paso (evaluación) en cual contempla las metodologías para la formulación del modelo de restauración y el modelo para la determinación del stock de carbono en las microcuencas de Alto Loica.



El capítulo 6 abarca en extenso lo indicado en el capítulo anterior y está orientado a la aplicación de la metodología expuesta centrada en la fijación de carbono. En otras palabras, el capítulo formula el modelo y los datos utilizados para el desarrollo de la investigación. Además de explicar las estrategias estipuladas en cada paso para la concreción de la tesis. En este capítulo se da forma a los tres primeros apartados formulados en la metodología, es decir, se tipifica la extracción, análisis y especificación estableciendo además los pasos metodológicos y estrategias a utilizar para la formulación de los modelos finales.

En el capítulo 7 se presentan los resultados de la investigación centrados en cuatro grandes bloques: análisis de la situación actual de las microcuencas, estudio integral de suelos, modelo de restauración y modelo para determinación de stock de carbono. Aplicando los conceptos planteados en los capítulos anteriores, los resultados constituyen el paso 4 de la formulación inicial, es decir, apuntan a la validación y funcionalidad del modelo.

La discusión y conclusiones conforman el capítulo 8. Este capítulo se aboca a los siguientes tópicos: discusión, conclusiones, aplicaciones prácticas e investigaciones futuras. Las inferencias, síntesis y análisis de la respuesta al problema y la hipótesis planteada se discuten en este capítulo.

Finalmente, la tesis concluye con los capítulos 9 y 10, siendo estos la bibliografía general y los anexos respectivamente.



---

## CAPITULO II

### ESTADO DEL ARTE

---



La sofisticación de la sociedad es directamente proporcional a la cantidad de recursos a los cuales tenga disponibilidad; por ello, muchos países industrializados con bajos niveles de recursos naturales (elementos que si tienen en abundancia muchos países del tercer mundo o en vías de desarrollo) han volcado sus economías a la industrialización y manufacturación. El estilo convencional de explotación basado en un esquema productivista (contrastado con el esquema post productivista impulsado en Europa en el último tiempo) ha llevado a una explotación basada en un uso intensivo del suelo (Mather, 2006), por ejemplo, en el caso de Latinoamérica el crecimiento y desarrollo en muchos países (como Chile) ha tenido lugar a un enorme costo: transformación y deterioro de cada ecosistema tocado por la modernización (Rojas, 1993). Los cambios en el uso del suelo, la presión urbana sobre el recurso hídrico y la ausencia de un adecuado manejo de las cuencas hidrográficas han generado en las últimas décadas un agravamiento de los problemas de erosión, deforestación, crecidas e inundaciones en todo el mundo. En Chile el desarrollo económico (sobre todo a inicios de los años 80) ha originado fuertes presiones sobre los recursos naturales renovables, habiéndose diagnosticado diferentes problemas tales como la contaminación (de suelos, agua y aire) y agotamiento de recursos naturales en general, situación que puede originar graves conflictos sociales (Browm y Ferrer, 2000)

En Chile el afán colonizador de la zona sur (ante el temor que Argentina o países europeos colonizaran la zona de Magallanes por constituir éste el paso obligado del tráfico marítimo entre el Atlántico y el Pacífico) llevó a la destrucción de miles de hectáreas de bosque milenario para permitir el avance de los colonos y la construcción de carreteras y asentamientos (Vial, 1981). Por esto, ha ido tomando progresivamente forma (en los círculos intelectuales y académicos) un nuevo modelo donde desempeñan un cometido fundamental criterios menos economicistas y paulatinamente más equilibradores y ambientalistas, esto como producto del cambio operado desde mediados de los años setenta tras la crisis del modelo neoliberal y sus efectos diferenciados que se fueron consolidando en las últimas décadas del siglo XX (Plaza, 2006).

Las cuestiones de la naturaleza son un reto para el conocimiento y la investigación y constituyen también un incentivo para conocer los problemas ambientales globales y locales en relación con los aspectos educativos, sociales, políticos y culturales. Todo esto enmarcado por una cada vez mayor conciencia de lo que significa para la humanidad vivir en un planeta con espacios y recursos limitados, con una desmesurada expansión demográfica en las grandes ciudades y con enormes desigualdades entre los 5600 millones de habitantes que hay sobre la Tierra. Frente a esto, la investigación se presenta como el instrumento más eficaz para incidir de manera formal o informal sobre el comportamiento humano, que enseñe acerca del uso sustentable de los recursos y facilite conocimientos e información respecto de las cuestiones ambientales (Batllori, 2001). El problema del deterioro ecológico, pérdida de biodiversidad, el calentamiento global, etc.,

no se debe sólo a que haya más o menos educación e investigación ambiental, sino a un problema del modelo capitalista, ético y moral que prevalece hoy en día. Por otra parte, la salvaguardia de las cuencas hidrográficas (importantes como captadoras de aguas y recursos naturales renovables, entre otras cosas) no sólo corresponde a la población sino a instancias gubernamentales a través de la protección de las áreas naturales y en general leyes que protejan de las intromisiones de todo tipo de intereses en los bosques, barrancas, arrecifes, humedales, sitios de anidamiento, etc., lo cual, puede mitigarse mediante planes de ordenamiento territorial. El impacto de las actividades antrópicas es muy grande y ya se observan grandes sequías en algunos lugares (como en África) y exceso de precipitaciones pluviales en otros (sur de Estados Unidos y Asia). Si bien, estos cambios macroclimáticos son altamente significativos; los cambios microclimáticos son igualmente importantes porque el ser humano vive y realiza sus actividades en su entorno; por lo que éstas variaciones causan a su vez cambios en la humedad del suelo, la temperatura y aceleración en la velocidad de la erosión, lo que enfrenta al hombre a una serie de problemas ambientales (Batllori, 2001).

Los estudios a nivel mundial en materia de cuencas hidrográficas y suelos han permitido sentar bases y precedentes que solo hasta hace unas décadas eran casi impensadas debido a la inexistencia de conciencia ambiental respecto de los problemas referentes al uso y mal manejo<sup>17</sup> de los recursos naturales, ya que, la utilización de estos era imprescindible para una economía social de mercado sobre todo en los países del tercer mundo donde la posibilidad de salir del subdesarrollo se sustentaba en un aumento del producto interno bruto a costa de la depredación del suelo, flora y fauna. Los estudios ambientales (una vez visualizados los problemas a nivel mundial con una serie de conferencias en los años 70 respecto al tema como Triblisi y Estocolmo) demostraron ser la fuente más fidedigna para conocer el estado real de los recursos y cuáles eran las herramientas básicas para la utilización de estos y el establecimiento de planes de manejo adecuados que permitieran la sustentación de estos en el tiempo y su uso racional para su renovación y aseguramiento para las futuras generaciones (Jáuregui, 2002). A nivel mundial Estados Unidos ya contemplaba en los años 20 una administración del gobierno federal para estudios de suelos, países como Colombia, México y Brasil comenzaron a gestionar sus cuencas hidrográficas en los años 70 (Araya, 2009), en Chile los trabajos comenzaron en la CONAF a principios de los 90 y a nivel gubernamental comenzaron a hacerse plausibles a inicios del año 2010 con la puesta en marcha de la política nacional de cuencas hidrográficas, impulsada por la Corporación nacional del medio ambiente (CONAMA).

En el presente capítulo, se analizarán parte de los estudios llevado a cabo en la actualidad en materia de suelos, gestión de cuencas hidrográficas y estudios efectuados en materia de fijación de carbono atmosférico tanto en el ámbito nacional como internacional. Estos estudios tienen como fin último la utilización óptima de los recursos y el establecimiento de actividades productivas basadas en el desarrollo sustentable, aunque, avanzar tanto científica, holística y cualitativamente en esto último ha sido particularmente difícil debido principalmente que las ciencias ambientales pasaron muy

---

<sup>17</sup> Técnicamente existe una diferencia sustancial entre “uso” y “manejo de recursos”. El uso está referido exclusivamente a la utilización (en muchos casos irracional) de recursos naturales (animales, vegetales y/o minerales) sin la concientización que estos no son infinitos, en cambio, el manejo plantea la utilización de recursos con planes que contemplen la renovación (cuando sean renovables) de éstos y la utilización tal que no ponga en peligro su existencia ni su resiliencia.

rápida mente las dimensiones propias de una ciencia<sup>18</sup>. De la misma forma se analizan los estudios llevados a cabo en Chile, Latinoamérica y el mundo, los cuales, han demostrado formar los cimientos cognitivos para el establecimiento de futuros planes de manejo, los cuales, en forma integral permitan el uso racional y equilibrado de los recursos naturales. El estado del arte en materia de gestión integrada de cuencas hidrográficas y estudio de suelos es rico en variabilidad, lo cual, otorga un amplio bagaje epistemológico que hace que los estudios sean referentes para cada país y cada cultura en lugares y sitios específicos, donde, el componente cultural es clave para la integración de elementos, debido a que el éxito de un plan de gestión debe insertarse en los cánones culturales e históricos de una comunidad, aspectos que habitualmente no son asimilados por los planificadores territoriales y las soluciones objetivas bajo las cuales construir las políticas ambientales rara vez ocurre en la realidad (Quintero, 2005).

## **2.1 GESTIÓN DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS**

### **2.1.1. Situación internacional en gestión de cuencas hidrográficas**

#### **2.1.1.1. Antecedentes a nivel mundial**

La productividad y la obtención de recursos fue durante siglos el principal eje en materia de cuencas hidrográficas. Sin embargo, la presión sobre los recursos debido a la sofisticación de los medios de producción y la presión demográfica, hizo que en el último tiempo los ejes se reestructuraran en función de la restauración y la rehabilitación de las cuencas, por lo tanto, muchos estudios en la actualidad apuntan a un paradigma conservacionista (Xu, et al, 2013). Se ha observado que uno de los principales elementos que afectan (y que afectará más intensamente en el futuro) es el cambio climático, ya que éste, altera el ciclo hidrológico con consecuencias en las precipitaciones, la evapotranspiración y la escorrentía superficial (Xu, et al, 2013); se ha pronosticado que en las cuencas del hemisferio norte (específicamente en EE.UU) las temperaturas se podrían incrementar en 2 a 3° C y las lluvias aumentarían en un 8%. (Sridhar, et al, 2013). En Asia (principalmente en China) se ha observado que su demografía ha incidido directamente en los recursos naturales ejerciendo una presión excesiva sobre el suelo debido a las actividades socioeconómicas, lo cual, ha sido clave para que las cuencas hidrográficas (principalmente en la zona centro del país) hayan perdido en forma significativa su capacidad de generar bienes y servicios, ante lo cual, se ha recurrido al manejo y a la incorporación de tecnologías, siendo la implementación de cubiertas vegetales el requerimiento más usados (principalmente por los campesinos) en la actualidad para restaurar las cuencas hidrográficas en esa zona (Fu, et al, 2013).

En muchos países (a diferencia de Chile), las cuencas hidrográficas han sido ampliamente estudiadas durante décadas (con seguimientos permanentes de hasta 40 años) como por ejemplo, la cuenca del Nilo Azul, el cual, es uno de los principales tributarios del Nilo y con una alta incidencia en el desarrollo socioeconómico de países como Etiopía, Sudan y el mismo Egipto (Gebremicael, et al, 2013). Los problemas

---

<sup>18</sup> Generalmente las ciencias pasan del plano teórico, al experimental – aplicado y posteriormente al tecnológico. Las ciencias ambientales pasaron muy rápidamente estas tres dimensiones por lo que no se conformó un estrato lo suficientemente sólido para afianzar sus bases teóricas y epistemológicas, a diferencia de otras ciencias como la química, la física o la astronomía cuyas bases teóricas se afianzaron por más de mil años. Las ciencias ambientales en cambio, pasaron muy rápidamente de ser una ciencia teórica a ciencia tecnológica.

observados en esta cuenca son la sedimentación, la erosión y los efectos del cambio climático, aunque –respecto a este último– las últimas investigaciones lo sitúan como un fenómeno con efectos aleatorios en las cuencas y otras, combinan este fenómeno con los efectos antrópicos tales como deforestación y cambio de uso de suelo (Taye y Willems, 2012). Básicamente, los estudios en cuencas han tratado de dimensionar el problema de la pérdida de productividad de suelos llegando (en algunos casos) a detallados catastros de suelos para conocer el problema en profundidad (Aydinalp, 2004)

Un elemento que juega en contra de la restauración de cuencas es la valoración dada a los recursos provenientes de ellas, ya que, las especies con mayor valor económico y comercial son en la mayor parte de las veces las especies con mayor valor ecológico (esto ocurre con bastante frecuencia en América y África). Maldonado y colaboradores (2013) demostraron esta relación en cuencas del norte de México, descubriendo que esto ha producido un serio desbalance en los ecosistemas estudiados. Muchos árboles usados (algunos de los cuales tienen un alto valor comercial) son las especies con mayores atributos ecológicos en la cuenca del Río Balsas (Maldonado, et al, 2013). Lo anterior puede redundar en serias alteraciones ecológicas desencadenando a su vez, alteraciones económicas por la escases o la falta de recursos. Ante esto es indispensable una política de manejo, ya que el manejo inadecuado puede tener efectos colaterales como elevar y cambiar significativamente las características del suelo en las cuencas hidrográficas como por ejemplo, cambio de pH y alteración en los niveles de N, P y K en el suelo (Moritzuka, et al, 2013).

Berhanu y colaboradores (2013) sugieren que para hacer frente a los nuevos desafíos en materia de protección de los recursos naturales en las cuencas hidrográficas es indispensable una política en la cual la regionalización de un territorio se efectúe tomando a la cuenca como unidad geopolítica. De esa forma habría una forma óptima de manejo, ya que los recursos especialmente el agua y el suelo tendrían un mejor aprovechamiento y distribución. Una de las primeras tareas en este punto sería una identificación y mapeo detallado de suelos, lo cual, no se ha efectuado con el detalle apropiado. Esto ocurre (por ejemplo) en África donde el manejo es casi inexistente y la estructuración política y organizacional basada en cuencas sería la mejor solución para delinear los futuros planes de manejo para enfrentar la escases de recursos hídricos (Berhanu, et al, 2013)

Los estudios empíricos llevados a cabo en las cuencas hidrográficas han sido con el objeto de establecer políticas para la conservación de los recursos existentes (Wallis, et al, 2013). Pero, es indispensable efectuar antes pruebas predictivas y prospectivas acerca del comportamiento de las cuencas hidrográficas ante determinados escenarios, con lo cual, se establecen las medidas necesarias a tomar. Para esto es necesario el trabajo con modelos matemáticos, ya sea, predictivos o prospectivos; por ejemplo, los efectos del cambio climático son aleatorios por lo que la aplicación de modelos reduce la incerteza generando aproximaciones a la realidad. Uno de los primeros ejemplos lo constituyó el desarrollo de la USLE (Universal Soil Loss Equation<sup>19</sup>) en 1965 cuando Wischmeier and Smith presentaron su ecuación para determinar la pérdida de suelos (Mintegui, et al, 2006). Por esto, en los últimos años, la modelación ha sido clave para la estimación y cuantificación tanto de la calidad como cantidad de recursos hídricos disponibles. Por ello, últimamente las modelaciones en base al SWAT (Soil and Water Assessment Tool) y el HSPF (Hydrologic Simulation Program-Fortran) han sido utilizados en conjunto para estimar los procesos hidrológicos (Xie y Lian, 2013). Aun así, no ha existido una

---

<sup>19</sup> Ecuación universal de pérdida de suelo



complementación entre los distintos elementos que interactúan en lo relativo a los recursos hídricos. Por ejemplo, uno de los elementos a considerar en materia de manejo es la medición de la calidad del agua: generalmente la medición de este parámetro se basa en análisis físico – químicos y los modelos generados apuntan a ese tipo de ensayos. Sin embargo a nivel general estos modelos nunca se integran con otros modelos que consideren el estado de la fauna como indicador de la calidad del agua (Holguin-Gonzalez, et al, 2013). Ejaz Qureshi y colaboradores (2013) dan otro ejemplo de lo anterior: muchos modelos matemáticos que representen las dinámicas biofísicas sobre de los recursos hídricos son usados para determinar las políticas públicas en torno al agua pero contrastan cuando se integran a las constantes económicas y sociales. Estos modelos han sido catalogados como simplistas y con poca validación empírica (Ejaz Qureshi, et al, 2013). Otro modelo matemático de interés desarrollado últimamente (en este caso para el cambio climático) es el THI (índice de humedad y temperatura), el cual, combina las temperaturas y los datos de humedad para efectuar predicciones a futuro en cuanto al cambio climático. Este modelo toma especial relevancia en materia de gestión de cuencas, ya que, se espera que el cambio climático se acrecentará en las cuencas del mediterráneo, específicamente en España, Francia e Italia y conllevara a una alteración no solo en suelos, sino también de la flora y fauna que habitan en ella. (Segnalini, et al, 2013)

Debido a que el cambio climático incidirá directamente en los recursos hídricos, uno de los elementos más estudiados ha sido la evapotranspiración, transformándose en uno de los elementos que más se considera en casos de manejo de fuentes hídricas (Kinoti, et al, 2010). Por esto, la evaporación es uno de los aspectos en que más se ha trabajado últimamente en materia de gestión, ya que, la pérdida de agua por este concepto en la actualidad es uno de los más grandes problemas en las reservas de agua de Europa (Maestre – Valero, et al, 2013)

Este concepto no solo está ligado a las reservas de fuentes hídricas, también es indispensable en el ciclo del agua y en la homeostasis de las condiciones bioclimáticas de los ecosistemas naturales, pero cuando este valor supera a la infiltración disminuye la biodisponibilidad de este elemento (Villem, et al, 1998), por ello, y a fin de evitar la evaporación extrema, se ha implementado el uso de cubiertas vegetales en muchas cuencas de Europa (Ruiz–Colmenero, et al, 2013). Lo anterior supone la implementación de cubiertas vegetales con el fin de evitar el impacto de la gota de lluvia y la subsecuente evaporación, lo cual, supondría la espera de mucho tiempo para conformar una cubierta vegetal con las características idóneas para dicha labor, pero con las medidas adecuadas es posible reforestar a escala humana (Wasige, et al, 2013).

En los últimos años –dados los problemas ocurridos en las cuencas– el manejo ha dado pie para la creación de políticas de manejo, las cuales, se han trasladado a la arena política para la creación de leyes de uso y conservación de recursos naturales en cuencas hidrográficas. Esto ha dado origen a los conceptos de gobernanza y gobernabilidad, lo cual, se ha traducido en políticas de manejo para enfrentar los nuevos escenarios (Wallis, et al, 2013), como por ejemplo, la protección de ríos y cauces, ha originado el concepto de “restauración de riberas”; esto se observa en casos de los bancos de arena, ya que, estos son relativamente débiles y son un canal de erosión lateral por lo que es indispensable restaurar la riberas para evitar el avance de la erosión de un canal (Ta, et al, 2013)

En otros ámbitos, las cuencas han servido para investigaciones interdisciplinarias, por ejemplo, la cuenca ha sido tomada como unidad biotopográfica para la combinación de

especialidades como la eco–epidemiología, en la cual, la ecología y la epidemiología se aúnan para determinar los alcances de los efectos depredador – presa en el entorno ecológico (Upadhyay, et al, 2013)

Mención aparte merecen los suelos en las microcuencas. Durante años, los estudios respecto de agua y suelos fueron sectorizados y con fines utilitaristas y/o economicistas por lo que el estudio integral de ambos recursos es de reciente data. Los estudios más acabados de suelos dicen relación con la erosión, debido a que es un serio problema medioambiental, económico y social, el cual, no solo causa problemas de degradación y baja la productividad de los suelos, sino que además, crea un serio problema a la sociedad en general para el desarrollo sustentable principalmente en zonas rurales (Wang, et al, 2013). Cabe señalar además que la erosión producto del impacto de la gota de lluvia es considerada una de las mayores amenazas al suelo en más de una tercera parte de los países miembros de la Organización para el comercio y el desarrollo económico (OCDE), los cuales, tienen más del 20 % de sus tierras cultivables con serios problemas de erosión (Prasuhn, et al, 2013). Esto ha hecho que se hayan implementado políticas ambientales en zonas en la cuales el suelo perdió su potencial productivo y de protección; tales medidas contemplan la prohibición de la labranza en tierras pendientes muy pronunciadas, protección de bosques naturales y la relocalización de la población de áreas protegidas (El Kateb, et al, 2013). Los problemas generados por la erosión en China, por ejemplo, han hecho que los suelos tengan una particular atención haciéndose políticas de reasignación de tierras conocida como “política de consolidación de tierras” que tiene por fin no solo evitar el avance de la erosión, sino que, aumentar la producción mediante el uso de técnicas ingenieriles (Liu, et al, 2013)

En vista de lo anterior, otro de los aspectos más estudiado es la infiltración, ya que, se ha demostrado que este factor es vital para la agricultura y la recarga de los acuíferos subterráneos. Los elementos más estudiados en lo que respecta a la infiltración son: la inclinación (pendiente), régimen de lluvia, textura y estructura del suelo y cobertura vegetal, entre otros. Sin embargo, la mayoría de los estudios solo se limita a la infiltración considerando solo uno o dos de estos factores, sin considerar la interdependencia de estos fenómenos, sobretodo, en zonas cuya actividad agrícola depende casi en su totalidad del régimen de lluvia (Huan, et al, 2013), esto último se acentúa en países exportadores cuya economía se basa en la agricultura intensiva con un carácter netamente economicista que se sobrepone a los criterios ambientales (Meki, et al, 2013)

Los últimos estudios en los suelos del Mediterráneo, han demostrado la alta vulnerabilidad de estos a la erosión, ya que, la degradación del suelo y la pérdida de nutrientes, son importantes problemas ambientales en la agricultura en ambientes semiáridos de la cuenca del Mediterráneo (Ruiz-Colmenero, et al, 2013). En muchos sectores (principalmente en la industria del viñedo) las técnicas más usadas en la actualidad para combatir la erosión son labranza tradicional, cubierta permanente de *Distachyon brachypodium* y la cosecha y segado de primavera. El segundo tratamiento ha tenido buenos resultados disminuyendo la erosión y aumentando la infiltración en los suelos favoreciendo los cultivos y la recarga de las napas freáticas; además de mejorar las condiciones del suelo y reducir la fuerte dependencia de los fertilizantes industriales (Ruiz-Colmenero, et al, 2013).

Todo lo anterior se ha sumado a las directrices establecidas por la directiva marco del agua en cuencas hidrográficas, las normas de condicionalidad y las estrategias nacionales de conservación del suelo a nivel europeo (Prasuhn, et al, 2013). Esto se

simplifica en los siguientes puntos: políticas obligatorias (comando y control); políticas voluntarias basadas en incentivos (por ejemplo, medidas agroambientales esquemas), consultas y medidas de sensibilización (Prasuhn, et al, 2013).

### **2.1.1.2. Gestión de cuencas hidrográficas en Latinoamérica**

A nivel latinoamericano, el tema de las cuencas hidrográficas es relativamente reciente, México, Colombia, Ecuador y Argentina incorporaron este tema en sus agendas en los años 80, mientras que en Chile la estrategia nacional de cuencas hidrográficas se instaló (en la entonces Conama) a inicios del año 2010<sup>20</sup>.

La erosión hídrica es muy común en países sudamericanos debido a la existencia de cordones montañosos que cruzan el continente de norte a sur por lo que forman numerosas cuencas con sus respectivas redes hidrográficas, las cuales tributan sus aguas al Pacífico y el Atlántico. Debido a esto, la erosión hídrica ha sido uno de los tipos de erosión más estudiados en los países de Sudamérica (Rienzi, 1999)

En Colombia se han aplicado múltiples modelos en muchas cuencas para estudiar el comportamiento de los ríos principales y sus tributarios con el fin de contextualizar y representar los procesos que allí se producen tales como la infiltración, evaporación, flujo subsuperficial y flujo subterráneo (Chang and Chen, 2001). En la cuenca del río Aburrá (1220 Km<sup>2</sup>) que contiene el área Metropolitana conformada por la ciudad de Medellín y nueve municipios más se han efectuado modelos de escorrentía para la predicción de caudales; modelos basados principalmente en mecanismos de ajustes de parámetros para analizar el comportamiento fluvial cuando las variables de estado cambian en distintos escenarios (Chang and Chen, 2001). Otro modelo muy aplicado en Latinoamérica es el del modelo GR4J (Génie Rural à 4 paramètres Journalier), el cual es un modelo de 4 parámetros que ha sido calibrado en numerosas cuencas de Francia, Estados Unidos y Australia. La calibración de este modelo en una cuenca con características de clima tropical permite establecer el comportamiento hidrológico de una cuenca en un medio donde la variabilidad espacial y temporal de la precipitación es alta y además en una cuenca con desarrollo urbano alto y cuyas aguas residuales afectan el régimen de caudales diarios (Carvajal, 2007).

“En México se ha realizado experiencias para establecer zonas prioritarias en sus principales cuencas como por ejemplo en Lerma – Chapala. En esta cuenca (durante el periodo 1976-2000), se registró una disminución de 817,2 km<sup>2</sup> de selvas y 1,562 km<sup>2</sup> de bosques, a favor de la expansión de áreas de cultivo (+107,86 km<sup>2</sup>) de pastizales cultivados e inducidos (+758,7 km<sup>2</sup>) y de matorrales y bosques secundarios (+263,5 y +975,37 km<sup>2</sup>, respectivamente) (Cotler, 2004). En este país la erosión hídrica superficial, la erosión hídrica en cárcavas y la declinación de la fertilidad abarcan más del 90% de la degradación de suelos. A diferencia de muchos países en Sudamérica, en México se ha trabajado intensamente en el manejo integral de las cuencas hidrográficas principalmente a través de la Dirección de Manejo Integral de Cuencas Hídricas-INE” (Semarnat, 2013)

---

<sup>20</sup> Esta política no fue un 100% exitosa y no se concretó según sus lineamientos iniciales debido a que en Chile las cuencas son multisectoriales y ese año se estaba llevando a cabo la institucionalidad para la creación del Ministerio del medio ambiente, el cual, se creó mediante Decreto Supremo el 1 de octubre de 2010. Además, aun no hay consenso entre el gobierno y otros estamentos (como universidades y organismos técnicos) en cuanto al concepto cuenca, ya que, para la Dirección general de aguas del gobierno (DGA) la cuenca solo implica “agua” y sus usos, en cambio, otras entidades (como Conaf) visualizan en su política a la cuenca como una entidad holística y ecosistémica.

Los usos de las cuencas en México estuvieron orientados por décadas a la producción, lo cual, conllevó a su rápido deterioro debido a que los ejes productivos estuvieron enfocados en la demanda poblacional y no en la conservación. En los últimos años sin embargo, el énfasis estuvo en programas de conservación para lo cual se cambió el paradigma de multifuncionalidad, el cual, conllevaba a que cada ente quisiera dar al suelo una función específica lo que permitía la intervención de éste sin planes multisectoriales lo que conllevó a su rápido deterioro. A nivel nacional, los aspectos más estudiados en las cuencas mexicanas son: la erosión hídrica superficial, la erosión hídrica en forma de cárcavas y la declinación de la fertilidad (Cotler, 2004), sin embargo, el nivel regional del análisis permite discernir que la erosión del suelo en forma de cárcavas se presenta principalmente ante sistemas de agricultura de temporal, pastizal y vegetación natural. La erosión superficial del suelo se presenta principalmente ante sistemas de agricultura de temporal y esporádicamente con agricultura de riego, vegetación natural y pastizal, tanto en tierras con tenencia estatal como propiedad privada” (Cotler, 2004). “Otro elemento estudiado en la gestión de cuencas, es la información hidrológica, especialmente cuando el agua es para consumo humano como en Jalisco, México” (Flores, 2003).

“En Argentina se han llevado a cabo experiencias similares. En muchas cuencas en la provincia de Buenos Aires se ha analizado el coeficiente de erosionabilidad de suelos como elemento básico para la determinación de erosión de suelos usando la ecuación de USLE en conjunto con SIG” (Gaspari, et al, 2009)

En la cuenca del río Santa María en la provincia de Catamarca, se identificaron áreas en donde era posible atenuar los procesos erosivos con prácticas sencillas de manejo de suelos y determinar las limitaciones que pueden presentarse en la aplicación de estas prácticas en estas zonas áridas. El uso combinado de la información de la cartografía de suelos con los resultados de los modelos orientados a los procesos dinámicos permitió la selección de áreas susceptibles de restaurar con prácticas de manejo sencillas que significaron aumentar el grado de cobertura y mejorar el estado de la vegetación natural, además de detectar los sectores en los cuales tales prácticas no tendrían ningún resultado. La complejidad de los aspectos relacionados con el factor de erodabilidad de los suelos, unido a la falta de información básica de las interrelaciones que podrían presentarse con los procesos erosivos, obligó a extremar los cuidados para su aplicación en las cuencas de zonas áridas (Rienzi, 1999)

En las cuencas hidrográficas de los ríos Yaracuy, Tocuyo y Boconó, en el estado Yaracuy, Venezuela, se han desarrollado programas de conservación de suelos y aguas con la finalidad de mejorar las condiciones de vida de 10.812 productores de la zona y disminuir los procesos de erosión de 49.100 ha en su área de influencia. Se introdujeron además prácticas conservacionistas a través de un programa de transferencia de tecnología que tenía como finalidad que los productores beneficiarios adoptaran un paquete tecnológico adecuado para la conservación de los suelos e incremento de la productividad agrícola. (Mora, 2003)

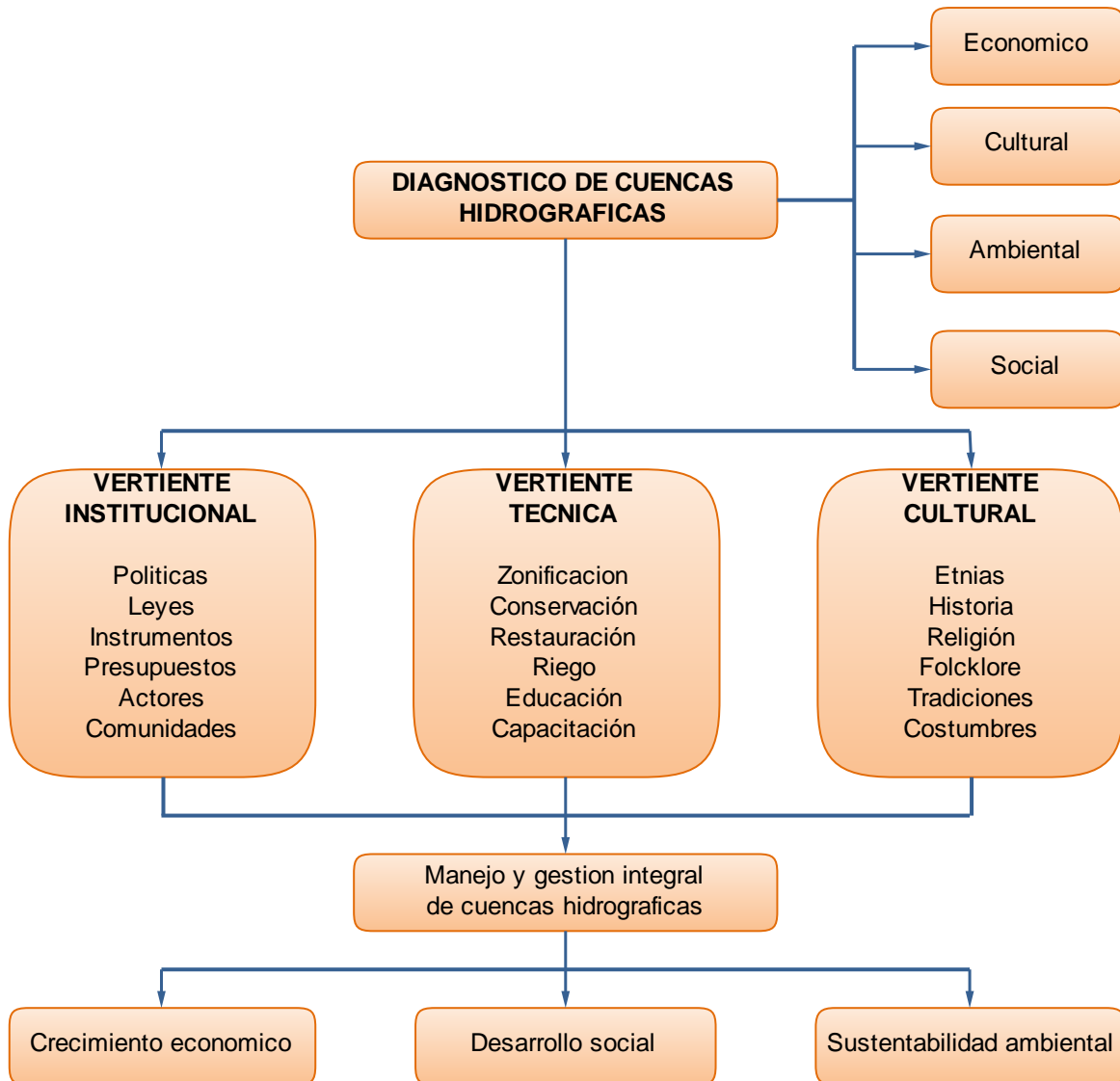
En el caso de las áreas agrícolas del Ecuador –hasta inicios del presente siglo– no se disponía de información sobre escorrentía; la información climatológica se reducía a algunos registros de precipitación, evaporación y temperatura (González, 2001), aunque, se han realizado experiencias en conjunto con expertos de la CONAF Chile, lo cual, ha dado origen a planeamientos sobre gestión de cuencas hidrográficas y recuperación de suelos principalmente a la provincia de Chimborazo, zona cuyas cuencas son muy

montañosas y de una geografía escarpada, atravesada por sierras intermontañas que forman parte de la Cordillera de los Andes (Francke, 2009).

“A través de programas del estado e instituciones locales o externas y privadas, se han llevado a cabo diversos e importantes programas de forestación, principalmente desde los años 80 basados en plantaciones forestales de *Pinus Patula*, *Pinus Radiata* y *Eucaliptus Globulus*, constituyendo una superficie de 25.000 ha, para una potencialidad forestal del orden de los 200.000 ha” (Francke, 2009). No obstante, los bajos o medios rendimientos volumétricos de las plantaciones debido a la degradación actual y altitud de los sitios, su función de protección de suelos y cuencas resulta fundamental y su aporte a la sostenibilidad de las economías locales debe garantizarse a través de programas que consagran la reforestación de las nuevas masas forestales (Francke, 2009). “Por otra parte, el programa de Gobierno detenta metas de plantaciones forestales en un horizonte de 20 años de 1.000.000 ha para fines comerciales (75%) agroforestería (15%) y de Protección y conservación (15%), planes en los cuales CONAF compartió experiencia y asesoría al respecto”. (Francke, 2009).

RECURSO	PROBLEMAS OBSERVADOS
<b>Vegetación</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Deforestación generalizada de los ambientes vegetacionales nativos.</li> <li>• Quema de vegetación nativa, pajonales y páramos como práctica regular.</li> <li>• Aprovechamiento del Bosque con fines energéticos para actividades humanas de subsistencia.</li> </ul>
<b>Suelo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Procesos generalizados de degradación de suelos y desertificación.</li> <li>• Procesos intensivos de erosión hídrica y eólica</li> <li>• Empleo inadecuado de prácticas degradantes del suelo, tales como; barbecho, arado de pendiente, sobrepastoreo, monocultivos reiterados</li> <li>• Presencia de sustratos compactados de canchagua.</li> <li>• Pérdida de productividad agropecuaria de los suelos</li> <li>• Avance de la frontera agrícola con usos actuales no compatibles y sostenibles del suelo.</li> <li>• Deslizamientos de suelos y fenómenos de potenciales remoción en masa en función de las pendientes muy escarpadas, asociadas a falta cobertura vegetal y a suelos inestables y frágiles.</li> </ul>
<b>Hídricos-“cuencas”</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Déficit hídrico plenamente a las cuencas hidrográficas</li> <li>• Alta vulnerabilidad a sequía</li> <li>• Aplicaciones de sistemas de riesgos deficientes y restringidos.</li> <li>• La falta de cobertura vegetal</li> </ul>

**Tabla 2.1. Problemas ambientales asociados al manejo de cuencas hidrográficas de la provincia de Chimborazo en Ecuador.** Los problemas ambientales detectados en cuencas del Ecuador dio origen a la cooperación entre las autoridades ambientales ecuatorianas y chilenas. Los principales problemas estaban a nivel de gestión en vegetación y pérdida de suelos. Fuente: Francke, 2009.



**Figura 2.1. Propuesta de planificación y gestión ambiental integrada de cuencas hidrográficas, provincia de Chimborazo, Ecuador.** El programa (a diferencia de los planes chilenos), contempla la integración de las variables culturales, sociales, ambientales y económicas las cuales, dan pie para la convergencia de 3 vertientes que finalmente dan origen al plan de manejo integral de cuencas hidrográficas. Fuente: Conaf, 2009.

Sin embargo, estudios posteriores (Francke, 2009) demostraron que las plantaciones prospectadas presentaron deficiencias nutricionales (N, P, K, B, confirmadas por análisis de suelos y foliar), por lo que se requirieron análisis más acabados antes de emprender programas masivos de forestación. Por otra parte, la forestación se complementó con técnicas de conservación de suelos y control de erosión (Francke, 2009). Estos planes tenían como fin no solo la restauración ambiental de cuencas degradadas, sino, mejorar la productividad silvoagropecuaria, principalmente en las cuencas de los sectores Licto, Las Flores y Punín (Francke, 2009).

La implementación de estudios para la rehabilitación de cuencas permitió la recuperación de suelos vía subsolado y riego (750 ha. Aprox.) para fines silvoagropecuarios, de tal forma de promover una agricultura diversificada en productos agrícolas, tales como: papa, cebada, fréjol, haba, frutales, entre otros. Así como también la incorporación del Aliso y/o Retama como cortinas cortavientos, el pasto milin como barreras libres y el empleo del genero *lupinus* para mejorar suelos de baja fertilidad, especialmente nitrógeno (Francke, 2009). En Ecuador (al igual que Perú) se han analizado durante años las técnicas precolombinas de cultivo y tratamiento de suelos (principalmente de origen inca) tales como las terrazas de formación lenta y el manejo de los andenes con sistemas de drenaje (Francke, 2009). Estas prácticas representan técnicas de conservación de suelos y agua que deben rescatarse, mantenerse y perfeccionarse, especialmente a través de la introducción de norias o pozos de captación, sistemas de riego por goteo y alternancia de los cultivos. Así como también la introducción de especies arbóreas y arbustos como barreras vivas y cultivos de protección. (Francke, 2009).

## **2.1.2. Gestión medioambiental de cuencas y suelos en Chile**

### **2.1.2.1. Gestión de cuencas hidrográficas en Chile**

“La experiencia y evolución del manejo de cuencas en Chile ha tenido diversas fases y énfasis. Durante los años 70, en el marco del proyecto FAO-CHF-PNUD-FO-SA-CHI 66-526, el MINAGRI a través de la COREF (Corporación de Reforestación, actual CONAF), crea la sección de Hidrología Forestal y de Corrección de Torrentes. Con esto se inicia un proceso de diagnóstico y ejecución de proyectos en cuencas críticas, que incluían principalmente actividades en forestación, obras de protección de cuencas y cauces, lo que se tradujo en acciones de restauración hidrológica forestal para la corrección de torrentes para la prevención y defensas contra inundaciones y/o crecidas en situaciones de emergencia” (Francke, 2003)

A comienzos de la década del 80 se introduce el concepto de manejo integral de cuencas hidrográficas lo cual se define como un “conjunto de esfuerzos tendientes a identificar, aplicar opciones técnicas, socioeconómicas, legales, que establecen una solución a la problemática causada por el deterioro y mal uso de los recursos naturales renovables en cuencas hidrográficas, para lograr un mejor desarrollo de la sociedad humana inserta en ella y en la calidad de vida de su población”. En lo fundamental se intenta incluir en esta fase la participación activa de la población en las etapas de ejecución y planificación participativa de los proyectos. (Francke, 2003)

En esta fase, el programa nacional de manejo de cuencas hidrográficas se estructura en base a la ejecución de proyectos en cuencas críticas y/o prioritarias, la capacitación de profesionales y la dictación de normativas legales atinentes al tema. Por otra parte, se orienta al fomento de incentivos públicos-privados para el manejo de recursos naturales renovables a nivel de cuencas hidrográficas (Francke, 2003)

A comienzos de la década del 90 un hito relevante lo constituyó el 1° Congreso Iberoamericano de manejo integrado de cuencas hidrográficas patrocinado por FAO, MINAGRI, CONAF y Universidad de Concepción que se efectuó en la ciudad de Concepción en 1990. Encuentro al que se dieron cita alrededor de 700 especialistas de la región de América Latina, El Caribe y España. A contar de la década del 90 el programa nacional de manejo de cuencas se estructura en base a:

- El apoyo de la cooperación técnica internacional.
- La formulación de proyectos de manejo integrado de cuencas hidrográficas en Chile BID/CONAF/MOP en cuencas críticas y prioritarias.
- La formulación de un programa para el manejo de recursos hídricos a nivel de cuencas BID/MOP/CONAF.
- La formación de comisiones a nivel de cuencas, MINAGRI – MOP (Ministerio de Obras Públicas).
- La aplicación y extensión de instrumentos de fomento a nivel de cuencas hidrográficas.
- La promulgación de nuevas leyes de protección ambiental de los recursos naturales.
- La suscripción de acuerdos internacionales en materias de medio ambiente.
- La capacitación permanente de profesionales a nivel nacional e internacional. (Francke, 2003)

“En la actualidad han emergido las políticas ambientales y/o sectoriales específicas, que por una parte, incluyen dentro del concepto de desarrollo sostenible al manejo de cuencas y por otra parte relativizan su verdadero rol en nuestra sociedad actual” (Francke, 2003).

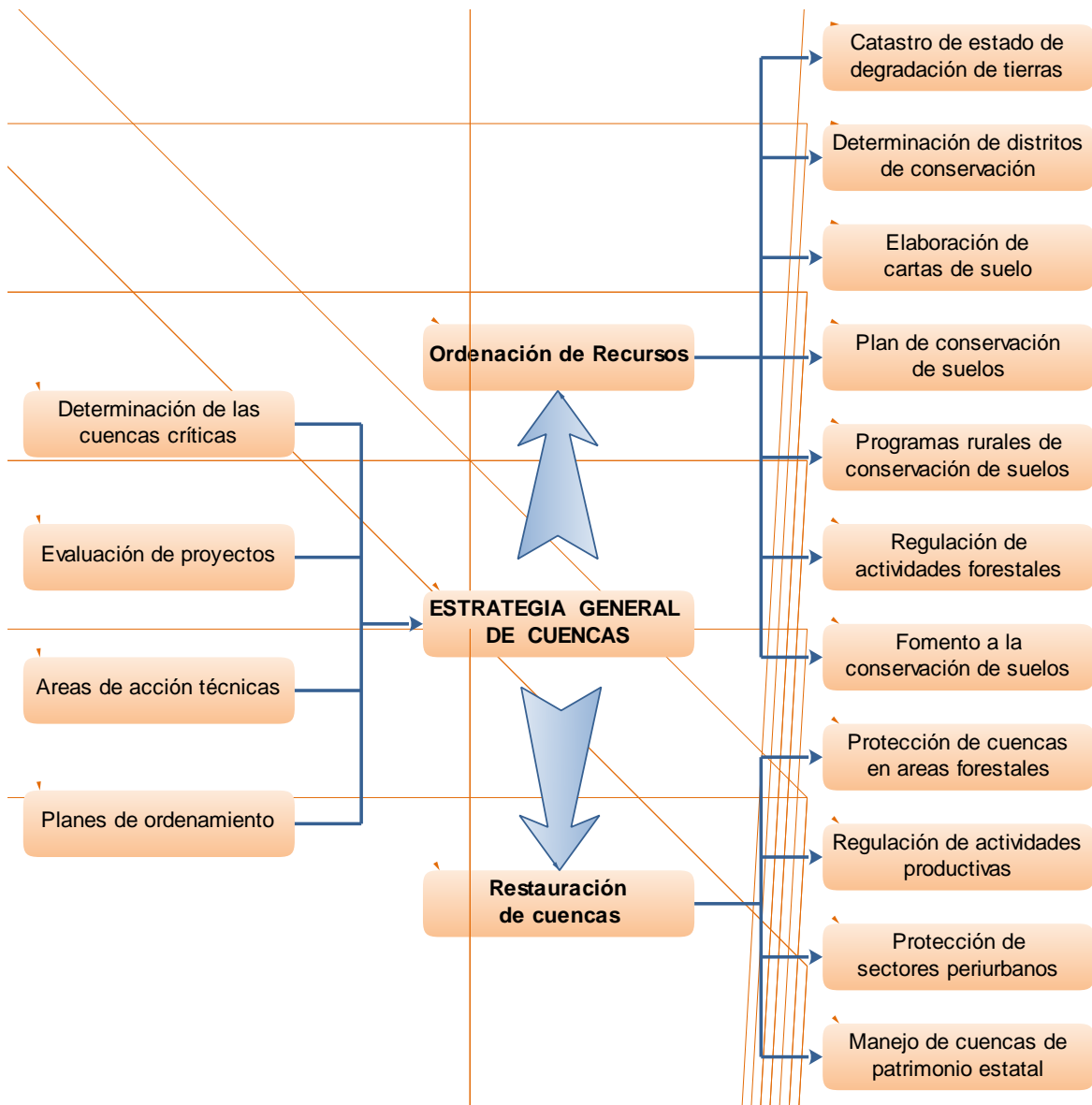
La cuenca hidrográfica entonces, en lo que respecta a su definición espacial y funcional, constituye entonces la unidad geopolítica y socioeconómica de planificación y gestión más apropiada y racional para el desarrollo integrado de los recursos de tierras y aguas asociados a la vegetación y en conjunto con los usuarios de nivel local y regional (Francke, 2003), aunque, el manejo de cuencas en Chile ha estado históricamente vinculado con los riesgos naturales y supeditado a la configuración predominantemente montañosa del territorio. A ello hay que sumar la disminución de recursos en función del aumento de la productividad, la cual, ha afectado a gran parte del territorio nacional. A esto se suma la competencia por el recurso hídrico principalmente en la zona norte del país debido a la alta actividad minera de la zona.

Según Francke y colaboradores (2008), el marco general de acción del manejo de cuencas en Chile se ha realizado mediante:

- Un conjunto de políticas económicas y sociales de largo plazo.
- Una institucionalidad estable y en proceso de modernización
- Un marco legal y ambiental con fines de protección y de fomento
- Un conjunto de instrumentos de fomento sectoriales aplicados a nivel de cuencas hidrográficas.
- Un sector público que implementa políticas subsidiarias y de fomento al uso racional de los recursos naturales.

En Chile, una de las instituciones que más ha estudiado el tema de reforestación y recuperación de cuencas hidrográficas es CONAF, sus planes y fórmulas de manejo han sido la base no solo para estudios a nivel nacional, sino además, para otros países, como por ejemplo, los planes de recuperación de cuencas hidrográficas en Ecuador.





**Figura 2.2. Estrategia general de gestión y manejo de cuencas hidrográficas de la CONAF.** Desde la primera mitad de los años 70, este organismo es el que más ha impulsado, trabajado e investigado el tema de la gestión de cuencas hidrográficas en Chile. Fuente: Francke, et al, 2008.

Los estudios impulsados por CONAF se han centrado en dos aspectos: (a) Ordenación de tierras y conservación de suelos y aguas y (b) la Restauración hidrológico forestal de cuencas hidrográficas (Francke, et al, 2008). Los primeros se han centrado en los siguientes aspectos técnicos:

*a) Catastro del estado de degradación de tierras forestales*

Evaluar la extensión y severidad de la degradación de tierras forestales con el objeto de priorizar y focalizar programas de conservación de suelos de tal forma de obtener información de aptitud, uso, limitaciones y características específicas de los mismos.

*b) Determinación de distritos de conservación de suelos, agua y bosques*

Con el objeto de aplicar la ley de distritos respectiva, se precisa fijar las zonas y prioridades de su aplicación.

*c) Elaborar Carta Nacional de Suelos y Sitios Forestales*

El escaso estado actual de conocimiento de suelos y utilización de información de los años 60, que no contempla información en vastas áreas donde concentran la gran potencialidad de suelos forestales, hace urgente la necesidad de contar con información actualizada del recurso suelo.

*d) Plan de Conservación de Suelos*

Implementar la propuesta de Plan Nacional de Conservación de Suelos y dentro del ámbito de las áreas de terrenos preferentemente forestales.

*e) Programas rurales de recuperación de suelos forestales.*

El Estado apoyará todos los esfuerzos del sector público y privado para restaurar los suelos forestales, en este sentido se focalizará el fomento de la forestación y recuperación de suelos en áreas degradadas.

*f) Ejecución de planes Rurales de Conservación de Suelos Forestales*

La implementación de planes rurales de conservación de suelos en áreas degradadas rurales y pauperizadas podría ejecutarse con la participación del sector privado y ejecución inicial de proyectos pilotos demostrativos a cargo de Instituciones del MINAGRI.

*g) Fomento a la conservación y recuperación de suelos*

Con el objeto que el sector forestal emplee técnicas modernas de mejoramiento y conservación de suelos como actividades de rutina de la gestión silvícola, Conaf fomenta su uso a través de estudios, proyectos pilotos, charlas, etc. La recuperación de suelos forestales degradados con plantación requiere lograr a través del uso forestal del suelo una alternativa que logre compatibilizar y optimizar la conservación del suelo y productividad del sitio forestal.

*h) Regulación de Actividades Forestales a través de Planes de Manejo Edáfico en Suelos Frágiles*

El establecimiento, manejo y cosecha de plantaciones o bosque nativo mediante prácticas y labores de quema, sistema de explotación especialmente el de tala rasa, cultivos agrícolas en suelos forestales, construcción de caminos y la aplicación de esquemas intensivos de manejo forestal, tienen impacto en la fertilidad del suelo, generan erosión y podrían alterar la productividad de sitios forestales en el largo plazo (Francke, et al, 2008)

La segunda línea de acción (restauración de cuencas se ha centrado en los siguientes aspectos:

*a) Protección de Cuencas Críticas en áreas Forestales*

Con el fin de proteger cuencas críticas en áreas forestales, se implementaron programas de manejo hidrológico-forestal y de conservación de suelos y aguas que fomentaron el establecimiento y desarrollo de sistemas apropiados de producción, manejo y protección.

*b) Regulación de actividades productivas en función del ciclo hidrológico*

Se regularon las actividades silvícolas, las actividades agropecuarias y del pastoreo de temporada, la construcción de diversas obras de infraestructura en terrenos de montaña con el objetivo de preservar la función hidrológica-forestal y de protección de suelos y cursos de agua.

*c) Protección de sectores periurbanos y de infraestructura*

Frente a fenómenos hidrometeorológicos extremos, riesgos naturales de tipo catastrófico y recurrentes, relativos a sequías, inundaciones, erosión torrencial, aluviones, avalanchas en zonas frágiles de montaña, se trabaja en conjunto con instituciones vinculadas (ONEMI<sup>21</sup>, DGA., Intendencia Regional) a programas de prevención y de control de la emergencia en cuencas abastecedoras de agua potable.

*d) Protección y manejo de cuencas hidrográficas del Patrimonio del Estado*

En forma integrada con los objetivos institucionales que mediante el “Sistema nacional de áreas silvestres protegidas del Estado” (SNASPE) protege el patrimonio ambiental de la nación, se está avanzando en la proposición de nuevas categorías del SNASPE que incorporen cursos de aguas, ríos o cuencas nacionales. Para ello es necesaria una institucionalidad que junto al uso racional de los recursos naturales en las cuencas comprendidas en el SNASPE sea pertinente y necesario (Francke, et al, 2008)

TIPO DE PROGRAMA	ORGANISMO	AÑOS DE EJECUCION DEL PROYECTO
Plan de Biodiversidad	BIRF	1990 – 1994
Plan de acción forestal	FAO	1990 – 1994
Plan de combate a la desertificación	FAO / PNUMA	1993 - 1995
Plan de conservación de suelos	BIRF	1994 – 1995
Planes anuales de riego	MINAGRI – MOP	1990 – 2000
Planes directores de cuencas	DGA – MOP	1995 – 2000

**Tabla 2.2. Planes nacionales vinculados al manejo de cuencas hidrográficas.** En el marco de planes nacionales vinculados directa e indirectamente a planes nacionales de manejo de cuencas se han formulado diversos planes y programas bajo el alero de organismos nacionales e internacionales desde el año 1990 en adelante. Fuente: Francke, et al, 2008.

<sup>21</sup> Oficina nacional de emergencia. Órgano dependiente del Ministerio del interior.

TIPO DE PROGRAMA	OBJETIVO	ORGANISMO	FINANCIAMIENTO	REGIONES ADMINISTRATIVAS
Cuencas Hidrográficas en Chile	Diagnóstico y formulación de proyectos	CONAF/DGA	BID/Mideplan Preinversión	6 Cuencas críticas en regiones I, V, VII, IX, XII R.M.
Cuenca Estero Barroso	Formulación y ejecución	CONAF/CATEV	BID/Mideplan Preinversión	VII Región
Cuenca Río Emperador Guillermo	Formulación y ejecución	CONAF/DEFOR	BID/Mideplan	XI Región
Cuencas hidrográficas de la zona semiárida	Planificación e implementación	CONAF	JICA-JAPON	R.M. y IV Región
Sistema Hidrológico Europeo SHETRAN	Investigación	CONAF	DED-UNIVERSIDAD NEW CASTLE Gran Bretaña	RM, VIII y X Región Calibración y validación del modelo sistema hidrológico europeo
Plan nacional de acción de combate a la desertificación	Planificación e implementación	CONAF/UNIV. DE CHILE	FAO/PNUMA	I – VII Región
Estudios de casos sobre desertificación	Diagnóstico	CONAF/UNIV. CHILE	ONU Convención Desertificación	IV y VII Región
Desarrollo Forestal participativo de los Andes	Planificación e implementación	CONAF	FAO/PAISES BAJOS	I – IV región

**Tabla 2.3. Principales proyectos y líneas de acción en la gestión de cuencas hidrográficas en Chile.** Los programas de manejo de cuencas han estado en función de la realidad de cada cuenca y las necesidades de la población, por ello, muchos planes han sido implementados en diferentes regiones siguiendo las necesidades de las cuencas hidrográficas según su productividad, problemas antrópicos y asentamientos humanos. Fuente: Francke, et al, 2008.

Continuación tabla 2.3.

TIPO DE PROGRAMA	OBJETIVO	ORGANISMO	FINANCIAMIENTO	REGIONES ADMINISTRATIVAS
Programa de Manejo de Recursos Hídricos	Planificación e implementación	MOP	BIRF	I, III, IV, V, VIII, IX región
Programa Ambiental en Cuencas	Planificación e implementación	MOP	GEF	I, III, IV, VI, VIII, IX región
Restauración áreas devastadas incendios forestales. Sierra Bellavista (VI región)	Restauración Hidrológica Forestal	CONAF	CONAF/FNDR VI REGION	Restauración áreas devastadas a través de revegetación y técnicas de control de erosión
Monitoreo de impactos suelos y aguas (IV, V, RM, IX, X región)	Evaluación impactos	CONAF	CONAF/FAO	Red. Nacional para la calibración del modelo USLE

TIPO DE PROGRAMA	OBJETIVO	ORGANISMO	FINANCIAMIENTO	METAS RESULTADOS
Programas de Plantaciones Forestales	Productivos y recuperación de áreas degradadas	CONAF	DL-701	2,5 millones de ha
Programas Forestación pequeñas propiedades	Productivos y sociales	CONAF	MINAGRI	250.000 ha
Programa Manejo del Fuego	Control de Incendios Forestales	CONAF	MINAGRI	2,0 millones há
Programa de Conservación de la Biodiversidad y protección de los sistemas hidrológicos	SNASPE	CONAF	MINAGRI	20% de la superficie del país pertenece al SNASPE
Programa de Control de Legislación Forestal.	Administración y fiscalización de la legislación forestal	CONAF	MINAGRI	10 millones de ha de superficie con planes de manejo
Programa de Manejo de Cuencas y Conservación de Suelos	Restauración hidrológica forestal	CONAF	MINAGRI	Red Nacional de proyectos en cuencas demostrativas regiones I, IV, V, VI, VII, VIII, IX, XI
	Protección de cuencas periurbanas			
	Protección de cuencas abastecedoras de aguas potable			
	Recuperación de suelos degradados			

**Tabla 2.4. Programas de CONAF vinculados al manejo de cuencas hidrográficas.** La CONAF ha estado llevando a cabo múltiples programas; los que se muestran en la tabla se efectuaron con el financiamiento del MINAGRI. Esto ha tenido como eje central la restauración ambiental de cuencas hidrográficas para la conservación de flora silvestre, corrección de torrentes, productividad agrícola y control de incendios forestales entre otros. Fuente: Francke, et al, 2008.

TIPO DE PROYECTO	OBJETIVO	FINANCIAMIENTO	METAS RESULTADOS
Restauración hidrológica forestal Cerro Divisadero XI Región	Corrección de torrentes	MINAGRI / FAO	Control de inundaciones y estabilización de taludes
Restauración hidrológica forestal Río Las Minas (XII región)	Corrección de torrentes	MINAGRI / FAO	Control de inundaciones y estabilización de taludes
Conservación de Suelos Tomeco (VIII región)	Control de erosión	MINAGRI / FAO	Control de erosión
Restauración hidrológica Río San José y Valle Azapa (I región)	Protección	MINAGRI / FAO	Protección crecida
Desarrollo agrícola cuenca Río Mapocho (RM)	Protección	JICA/JAPÓN	Protección – crecida
Protección contra avalanchas Illapel (IV región)	Protección de suelos	MINAGRI	Revegetación y estabilización de laderas
Protección embalses IV región	Protección de Recursos Hídricos	MINAGRI	Regulación áreas aportantes
Protección Cuencas abastecedoras agua potable: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Colcura (VIII región)</li> <li>• Puntum (IX región)</li> <li>• Llancahue (X región)</li> </ul>	Protección de Recursos Hídricos	MINAGRI	Estabilización de laderas y cauces
Red demostrativa nacional de conservación de suelos: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Las Cañas y los Sauces (IV región)</li> <li>• Las Chilcas (V región)</li> <li>• Sierra Bellavista (VI región)</li> <li>• Huerta del Maule (VIII región)</li> <li>• Quirihue y Yumbel (VIII región)</li> <li>• Los Sauces-Angol (IX región)</li> </ul>	Recuperación Suelos	MINAGRI	Aplicación de técnicas de conservación de suelos a nivel de microcuencas

**Tabla 2.5. Proyectos de manejo de cuencas hidrográficas y de conservación de suelos y aguas llevados a cabo por CONAF.** La tabla muestra los principales proyectos llevados a cabo por la CONAF entre los años 1970 a 2007. Fuente: Francke, et al, 2008.

### 2.1.2.2. Análisis y estudios de suelos en Chile

Los suelos en general se caracterizan por carecer de una normativa de carácter taxativa sufriendo los efectos de las externalidades de su uso, que en Chile se caracteriza por su carácter multisectorial (Francke, et al, 2008). Debido a esto son múltiples los estudios realizados y desde los más diversos ámbitos.

Un caso especial lo constituye la remediación de suelos que en Chile no ha alcanzado los niveles de aplicación que sí tuvo, por ejemplo, en las playas de la Bahía Príncipe Williams en Alaska durante el derrame de crudo del Exxon Valdez a fines de los años 80. Sin embargo se ha experimentado con fitorremediación en muchas partes del país principalmente en zonas afectadas por la actividad minera donde la concentración de metales pesados ha alcanzado niveles tales en que el suelo ha perdido su capacidad de otorgar bienes y servicios como es el caso del Valle de Puchuncavi en la región de Valparaíso (Mueña, et al, 2010). El medio ambiente en que se encuentran los suelos afectados por metales pesados está deteriorado y esto es visible en su aspecto semidesértico y en la evidente erodabilidad de los suelos (Ginocchio, 2000). La fitorremediación consiste en el uso de plantas para remover, contener o dejar en formas inocuas a los contaminantes del suelo (Pilon-Smiths, 2004), de tal forma que el porcentaje de los metales, susceptible de ser absorbida por organismos vivos, se mantiene inmovilizado, por lo que se evita su paso a las cadenas tróficas (Wong, 2003). La técnica permite además mejorar las condiciones del suelo al aumentar la cobertura vegetal (Méndez, et al, 2007). Mueña y colaboradores (2010), demostraron que el encalado mejora las condiciones de crecimiento de *Oenothera affinis* en suelos ácidos y contaminados permitiendo el potencial de esta especie vegetal para la fitoestabilización. También se ha demostrado la eficacia de los microorganismos del suelo en procesos de biorremediación para el caso de herbicidas; estos pueden tener efectos secundarios si quedan en el medio ambiente, sin embargo, los microorganismos del suelo mediante bioaumentación pueden degradar elementos tales como s-triazinas (Hernández, et al, 2008), lo cual, si es a futuro usado masivamente presenta un alto potencial para recuperar suelos degradados en el país (Hernández, et al, 2008),

En otros aspectos se ha avanzado en el estudio de la relación plantas – estabilidad de suelos. Federico Albert en el siglo XIX ya había realizado estudios en esta área utilizando especies vegetales para impedir el avance de las dunas en el sector de Chanco en la zona sur de Chile (Villa, et al, 1995). “La vegetación cumple un importante rol en la prevención de movimientos en masa de suelos, especialmente, los relativos a deslizamientos superficiales de taludes. De esta manera, las raíces de los árboles proporcionan un sistema de refuerzo que depende en gran medida de la conformación y de la distribución del sistema radicular que presenten” (Sanhueza y Villavicencio, 2012). De la misma forma, en la agregación del suelo los hongos también tienen una función vital manteniendo las propiedades físicas del suelo y facilitando los ciclos biogeoquímicos estabilizando los agregados en los sistemas naturales (Borie, et al, 2008)

Está demostrado que las actividades antrópicas causan cambios físicos y químicos en el suelo ocasionando la degradación de este (Leita, et al, 1999). Esta degradación implica pérdida de calidad lo que se manifiesta en un decrecimiento de la productividad y una alteración en las funciones ecológicas del suelo (Granatstein and Bezdicek, 1992). Esto último implica que el suelo es altamente dinámico y está íntimamente relacionado con todos los elementos a los cuales da soporte, por ello Cortes (2007) lo define como un medio biogeoquímico con una alta capacidad de interacción, por ello, Cartes y



colaboradores (2009) demostraron que en el suelo la actividad enzimática en la mineralización de nitrógeno es diferente de un suelo a otro dependiendo de las variables tales como la temperatura y la materia orgánica, ya que, las combinaciones químicas que el nitrógeno presente está directamente relacionado con las variables antes mencionadas. Esto es determinante para la actividad agrícola debido a la interacción nitrógeno – suelo – planta. Además, las hidrolasas implicadas en los ciclos del C, N, P y S sufren significativos cambios cuando las condiciones físicas y químicas del suelo se alteran; al igual que el carbono que está asociado a la biomasa microbiana (Trasar – Cepeda, et al, 2008)

En Chile (por su origen geológico, gran diversidad geográfica y climática), existen numerosos tipos de suelos siendo el más estudiado el Andisol, el cual se caracteriza por una alta capacidad de fijación de fósforo, baja densidad aparente, gran volumen de poros a distintos potenciales mátricos, alta conductividad hidráulica en fase saturada y no saturada, formación de agregados estables y una alta capacidad de contracción (Dörner, et al, 2009), aunque, se ha demostrado que estas propiedades se pierden cuando se efectúa un cambio de uso de suelo (Dörner, et al, 2009),

Dörner y colaboradores (2009) demostraron que las condiciones óptimas del suelo se pierden cuando éste es sometido a estrés producto del cambio de uso, lo cual altera el comportamiento hidráulico y la distribución de los poros, aunque, estos pueden recuperar su integridad debido a la concentración de materia orgánica.

Los estudios en cuanto a las propiedades del suelo en función de su productividad ha sido tema de larga data en Chile debido a su rol de país agricultor y los altos niveles de agua usados para este fin, por ello el rendimiento agrícola ha sido tema predominante, aunque, considerando los impactos ambientales no solo aquí , sino además en el extranjero (Keller and Brummer, 2002), pero el uso de la agricultura intensiva ha generado una alta degradación de los suelos y de los recursos hídricos (Drinkwater and Snapp, 2007). Es por ello que considerando como fin un aumento en la productividad de suelos la investigación dedicada a la volatilización de amoníaco a partir de la urea (principal fertilizante usado en gran parte de Chile) es de larga data (Casanova y Benavides, 2009). Respecto a este tema se ha avanzado en forma notable siendo gran parte de los estudios realizados en la zona sur de Chile (Casanova y Benavides, 2009).

Además las propiedades térmicas del suelo también ha sido objeto de estudio; se ha demostrado que el cambio de uso de suelo, alteraciones en el manejo y la compactación afectan sus propiedades térmicas (Dec, et al, 2009). “El manejo conservacionista presenta una estructura más estable y mejor desarrollada entre 0-30cm de profundidad cuando hay un mayor contenido de agua, siendo este el factor que rige sobre las propiedades térmicas” (Dec, et al, 2009). Las propiedades térmicas del suelo son importantes debido a que este se comporta como un sistema buffer, el cual, puede mantener estables las temperaturas a determinadas profundidades manteniendo la homeostasis radicular de las plantas y árboles (Dec, et al, 2009), lo cual es importante no solo para la agricultura sino también para la restauración ambiental de zonas degradadas.

## **2.2. ANTECEDENTES SOBRE INVESTIGACIONES DE FIJACION DE CARBONO ATMOSFÉRICO**

### **2.2.1. Antecedentes a nivel internacional**

Los estudios respecto de la cuantificación de la fijación de carbono nacen producto de las externalidades generadas por el exceso de carbono en la atmósfera producto de la combustión de combustibles fósiles (De Petre, et al, 2004). Resultado de ello fue el protocolo de Kyoto que reguló la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) a la atmósfera (Rodríguez, 2007), entre ellos el CO<sub>2</sub>, motivo por el cual, la fijación de carbono comenzó a tomar otra notoriedad.

La captura de carbono se efectúa en los ecosistemas arbóreos mediante el intercambio gaseoso con la atmósfera a través de los procesos fisiológicos de la fotosíntesis y la respiración celular, por lo que el carbono se almacena en la biomasa y en el suelo (De Petre, et al, 2004) por lo que la idea que los bosques, plantaciones y ecosistemas en general son reservorios de carbono ya es una idea ampliamente aceptada (Fonseca, et al, 2009). Por ello, el suelo es la principal fuente de carbono en el planeta, estimándose en alrededor de 2300 Gt solo en los primeros 3 metros (Bremenfeld, et al, 2013). Por lo tanto, las mediciones de carbono se han efectuado hasta 30 cm de profundidad (De Petre, et al, 2004) debido principalmente al uso dado al suelo lo que altera el intercambio natural de este compuesto entre la biomasa y la atmósfera. De Petre y colaboradores (2004) han estimado que el carbono se distribuye en el suelo según las zonas ecológicas, lo cual, se relaciona con diferencias en la temperatura y la lluvia; esto significa que en las zonas áridas el carbono fluctúa alrededor de los 4 Kg/m<sup>2</sup>, en las zonas polares 21 – 24 Kg/m<sup>2</sup> en las zonas tropicales entre 8 – 10 Kg/m<sup>2</sup>.

Sin embargo, los estudios relativos a la captura de carbono no solo se han remitido a las plantaciones forestales, sino también, a las actividades productivas como las silvopastoriles, en las cuales, la captura ha sido considerada como un servicio ambiental en la trama “animal – suelo” de esta actividad (Giraldo, et al, 2007), para ello se considera el carbono fijado en la biomasa aérea, la biomasa radical, el carbono almacenado en formas húmicas y el carbono que forma parte de las heces animales. Lo anterior con el fin que las actividades antrópicas tengan un desarrollo armónico entre los aspectos productivos y ambientales, todo enmarcado en proyectos de desarrollo que forman parte del protocolo de Kyoto (Giraldo, et al, 2007).

En la misma línea, el desarrollo de los denominados “mecanismos de desarrollo limpio” permitió que países con altas emisiones de GEI (destacando el CO<sub>2</sub>, como uno de los principales) invirtieran en proyectos de reducción de estos gases en países en desarrollo con un nivel de industrialización más bajo, todo esto otorgó un valor agregado a la captura de carbono transformándolo en un negocio internacional con millonarias ganancias (Gutiérrez y Lopera, 2001). Es por ello que en América latina se han efectuado numerosas plantaciones con este fin estudiándose especies arbóreas que tengan una alta tasa de fijación lo cual está íntimamente relacionado con su metabolismo y su rápido desarrollo, usándose por ejemplo, *Pinus patula* en muchas zonas de Colombia (Gutiérrez y Lopera, 2001), principalmente en el departamento de Antioquia.

Las actividades rurales en México son las responsables del 30 % de las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera en el país principalmente por el cambio de uso de suelo y la deforestación (Acosta, et al, 2001). Por ello, la captura de carbono además de contribuir a los aspectos

ambientales ha constituido un mecanismo de ingresos adicionales para medianos agricultores en las zonas rurales mexicanas, sin embargo, en la relación costo/carbono se ha considerado el hecho que no todo el carbono fijado ha derivado en biomasa utilizable, ya que, el 75 % del carbono secuestrado se encuentra en el suelo en forma de biomasa de raíces o como parte de los intermediarios de los ciclos biogeoquímicos (Acosta, et al, 2001). Aunque la información sobre la captura de carbono a nivel forestal aún es insuficiente para estructurar formas de compensación a los dueños de los bosques y plantaciones (Fonseca, et al, 2009). Los estudios de Acosta y colaboradores (2001) demostraron que la mayor parte del carbono subterráneo se fija en el suelo (bajo los 30 cm) y una baja proporción de este (< 1 %) se fija en las biomasa de raíces, independiente si se trate de sistemas agrícolas o forestales. De la misma forma, las variaciones en la captura de carbono varían tanto de una especie a otra como en las estructuras y tejidos arbóreos (Yerena, et al, 2012), esto ha dado lugar a numerosos estudios debido a que las variaciones del contenido en los tejidos del árbol no ha sido bien documentado ni en México ni en Centroamérica (Yerena, et al, 2012)

El cambio de uso de suelo respecto de la fijación de carbono ha sido también tema en otros lugares; Carvajal y colaboradores (2009) demostraron en la región de Alcalá (región cafetera colombiana) que los barbechos y monocultivos almacenan más carbono subterráneo, mientras que en los bosques la proporción es más baja. De la misma forma la altitud también es un factor determinante para la fijación de carbono, elemento que no es considerado en naciones con altitudes próximas a nivel del mar pero que si es ampliamente conocido en países andinos con altitudes sobre los 2000 msnm. Respecto a esto último, la fijación de carbono es superior en latitudes que fluctúan entre los 900 y 1600 msnm (Carvajal, et al, 2009) a pesar que la fijación es efectuada por plantas C3.

La transformación de una zona boscosa a agrícola (cambio de uso de suelo de boscoso a productivo) contribuye no solo a la degradación del suelo, sino que también contribuye al afecto invernadero liberando carbono a la atmósfera, Roncal-García y colaboradores (2008) plantean que el barbecho enriquecido contribuyen a la captura de carbono principalmente en el suelo y que mientras más complejo sea el sistema ecológico, mayor es la fijación de carbono atmosférico. Esto demuestra que el uso de barbechos enriquecidos presentan un valor y un servicio ecosistémico fundamental al contribuir a la captura de carbono (García-Roncal, et al, 2008).

Además de los bosques y plantaciones, Zermeño y colaboradores (2011), plantean la importancia de los pastizales como elementos ecológicos con el potencial de capturar carbono; en el norte de México las tasas promedio diarias fueron de 54, 12 Kg/ha, lo cual, contribuye notablemente a la fijación de este elemento. Los pastizales cubren aproximadamente 3,4 billones de ha en el mundo, por lo que los presentan una enorme contribución a la captura de carbono (Zermeño, et al, 2011). Otras especies de pasto como *Brachiaria brizantha* ha demostrado una gran capacidad de fijar carbono atmosférico en praderas cuando éstas son sometidas a renovación, esto significa que el pastoreo de rotación favorece la captura de carbono y por ende la producción de materia seca en un sistema silvopastoril (Cárdenas, et al, 2012)

### **2.2.2. Antecedentes en Chile**

En Chile, la gran mayoría de los estudios en materia de fijación de carbono se han centrado en plantaciones bajo el enfoque ecosistémico, aunque, estos estudios no han sido profundizados debido a la falta de una institucionalidad fuerte que resguarde el

cumplimiento de las leyes y normas que regulen el bosque nativo y un manejo que asegure una fuerte inversión del estado<sup>22</sup> (Donoso & Otero, 2005). La CONAF ha estado trabajando últimamente en la captura de carbono en especies arbóreas nativas considerando aspectos como latitud y clima, entre otros. Los modelos y formulas dendométricas fueron aportadas y calibradas por la GTZ (Drake, et al, 2003). “De lo anterior se deriva que una posibilidad de moderar la acumulación de CO<sub>2</sub> en la atmósfera es la captación y almacenamiento del carbono en los árboles en desarrollo, es decir a través del manejo de bosques o de las plantaciones forestales. Aun cuando existen dudas respecto a si los bosques están o no contribuyendo significativamente al cambio climático global, está claro que mientras mayor sea la superficie de la Tierra con cubierta vegetal, se tenderá a un balance más favorable en la captura de CO<sub>2</sub>. Si ésta cubierta vegetal es manejada, de forma de contar con una captura anual regular de carbono, y si los productos cosechados se usan para reemplazar algunas fuentes fósiles, se estaría avanzando de todas formas hacia una situación más favorable a nivel global”. (Gayoso & Schlegel, 1998)

Para el caso de la flora nativa, las especies más estudiadas han sido *Saxegothaea conspicua*, *Weinmannia trichosperma*, *Nothofagus macrocarpa*, *Nothofagus alpina*, *Nothofagus dombeyi* y *Araucaria araucana*. El carbono capturado en estas especies tiene diferencias significativas, siendo *Saxegothaea conspicua* la especie con mayor carbono orgánico en su biomasa y en general, la mayoría de las especies chilenas almacenan mayor cantidad de carbono en su fuste, más que en otras estructuras del árbol (Gayoso & Guerra, 2005), aunque, el contenido de carbono en la biomasa está en función de la edad de las plantaciones y la calidad del sitio (Cubero & Rojas, 1999)

Estos estudios no son de muy larga data en el país y por lo general se enmarcan en un propósito experimental–académico más que por aspectos económicos empresariales, aunque, muchos estudios plantean la factibilidad de integrar políticas públicas de desarrollo con servicios ecosistémicos como la fijación de carbono (Little & Lara, 2010) y en algunos casos se ha analizado la factibilidad de utilizar la fijación de carbono como una externalidad para la producción de materia arbórea de rápido crecimiento y rotaciones cortas (principalmente *Populus spp*) que sea usada como biocombustible debido a la escasa producción de petróleo en la país<sup>23</sup> y la cada vez mayor demanda de energía (Baetting, et al, 2010). Otra forma es mediante el mecanismo de compensación de las emisiones de GEI por la vía de la asociación o arreglos con empresas de países emisores de estos gases de tal forma que las disminuciones o fijaciones de carbono llevadas a cabo se acrediten en su totalidad o en parte al país emisor (Urrutia, 2010).

En otros aspectos, la captura de carbono por parte de las especies arbóreas ha sido un elemento vital vinculado a ciertos estudios de desarrollo urbano. Esto debido al hecho que la expansión urbana también es un elemento generador de GEI debido a que el aumento demográfico conlleva a un aumento en el uso de combustibles fósiles que contribuye a la emisión de GEI a la atmósfera principalmente CO<sub>2</sub>, por ejemplo, en la zona del valle de Elqui en la región de Coquimbo se ha diagnosticado que se necesitan 61 ha de bosques para fijar la carbono proveniente de 1 ha de zona urbana, aunque en esta región del país el CO<sub>2</sub> liberado excede en un 77 % la capacidad fijadora (Bascuñan, 2010). Esto ha obligado a replantear el paradigma sobre desarrollo urbano y ciudades sustentables, ya que, el crecimiento de las ciudades en el mundo no se ha detenido, teniendo este, una

---

<sup>22</sup> Lo que invierte el Estado chileno en áreas silvestres protegidas es menos de un dólar por hectárea.

<sup>23</sup> Solo el 2 % del petróleo consumido en Chile se extrae en el país.

tasa inversa a la creación de áreas verdes (Bascañan, 2010), aunque, cabe señalar que la mayor parte del carbono se encuentra en el suelo; el carbono orgánico existente en él, es un compuesto fundamental para el ciclo biogeoquímico de este elemento, el cual, asciende a un 69,8 % del carbono orgánico de la biósfera (Martínez, et al, 2008), siendo importante para disponibilidad de nutrientes, mantener el pH y facilitar el intercambio catiónico (Martínez, et al, 2008)

A pesar de las intervenciones efectuadas en muchas plantaciones con el fin de capturar carbono<sup>24</sup>, no existen en el país métodos cuantitativos para determinar si la intervención antrópica de un bosque está en sintonía con su rendimiento productivo, tampoco se conoce con exactitud las tasas de recuperación de los bosques después que estos han sido talados con fines productivos. En síntesis, no hay modelos prospectivos que indiquen como un bosque se comportará en su próxima renovación cuando ha sido intervenido con el fin de extraer sus recursos madereros en base al carbono fijado (Hube, et al, 2008)

### **2.3. DISCUSION**

De un paradigma basado en la explotación, el cual, tenía como eje que los recursos naturales eran infinitos se ha pasado a un modelo que apunta a la gestión de cuencas hidrográficas (basado principalmente en la restauración y rehabilitación), esto debido a los fenómenos ocurridos en los últimos años tales como pérdida de la biodiversidad, erosión, escases de agua y cambio climático, los cuales, han afectado a casi todo el mundo. Autores como Xu (2013) y Fu (2013) han planteado que en el día de hoy, el manejo de cuencas es la base para el sustento de los recursos naturales renovables, esto debido a que la deforestación y el cambio de uso de suelo son elementos que están presentes en casi todas las cuencas del mundo,

Para enfrentar estos desafíos la gobernabilidad y la gobernanza se han instalado como elementos claves para el manejo de cuencas considerando el ordenamiento de territorio como elemento central para una distribución más eficiente de los recursos naturales; esto es precisamente lo que no ocurre en África, donde la ingobernabilidad política y la inexistencia de planes de manejo producen una alta inequidad en la distribución de los recursos hídricos (Berhanu, et al, 2013).

Enfrentar el tema del manejo de cuencas involucra un problema de envergadura debido a la gran cantidad de actores y elementos que deben interactuar para gestionar en forma óptima la cuenca hidrográfica, autores como Holguin – González y colaboradores (2013) plantean que la fauna es un indicador que debe considerarse para establecer la calidad del agua, Ejaz Qureshi y colaboradores (2013) plantean que deben integrarse a los modelos las variables biofísicas para determinar las políticas públicas en cuanto al uso del agua, cosa que en muchas partes del mundo no se considera. La interrelación de los elementos que interactúan en una cuenca enriquecen los aspectos relativos al manejo, por ello, Kinoti y colaboradores (2010) dan especial importancia al tema de la evapotranspiración y Wasige y colaboradores (2013) insiste en el uso de cubiertas vegetales para evitar su minimización.

---

<sup>24</sup> Cabe recordar que en el país, esto constituye en la mayoría de los casos solo una externalidad, ya que, la producción maderera es el fin en la mayoría de los casos, incluso el D.S. 701 avala esta práctica con el incentivo a medianos propietarios para la producción maderera. En la mayoría de los casos esto se lleva a cabo con especies de rápido crecimiento y renovación como pinos y eucaliptus con un enorme problema ambiental como es la desecación de las napas freáticas.

Al hablar de cuencas no solo se habla de agua, sino, de todos los elementos que en ella interactúan, por ello los suelos también han sido objeto de un estudio constante para evitar o minimizar aspectos como la erosión y la desertificación. En muchos países los estudios del suelo son sectorizados debido a la multiplicidad de usos dados a él; sin embargo las soluciones para minimizar los impactos en él son diferentes según el grado de daño y los recursos, para ello El Kateb y colaboradores (2013) plantean la prohibición de la labranza en zonas con pendiente y la protección de bosques, en cambio, otros autores como Liu y colaboradores (2013) proponen soluciones más drásticas como la reasignación de tierras y la movilidad de poblaciones para proteger zonas con valor ecológico.

El estado del arte demuestra que en Latinoamérica el tema no es menor, si bien, muchos países tienen políticas de cuencas hidrográficas, los problemas más comunes son desertificación (como en el norte de Chile y México), sequías continuas, pérdida de biodiversidad (como en Brasil) y erosión (principalmente de tipo hídrica debido a la escorrentía de los ríos que bajan de las líneas montañosas que forman la Cordillera de los Andes, la cual, se produce por la alta tasa de deforestación). Por ello, países como México, Ecuador, Venezuela y Argentina han tratado el tema desde el punto de vista de una integración ecológica basada en cuencas hidrográficas, a diferencia de Chile en el cual el tema se ha tratado a través de políticas públicas sectoriales cuyos resultados no han sido los óptimos a pesar de los recursos invertidos<sup>25</sup>.

En Chile las políticas forestales han sido eminentemente sectorizadas; prueba de ello es la existencia de la CONAF (adscrita al MINAGRI) cuya función es conservar las áreas silvestres protegidas y fiscalizar el cuidado de los bosques y plantaciones; pero carece de las atribuciones legales suficientes por existir una multiplicidad de actores respecto de un mismo problema, por ejemplo, múltiples ministerios tienen incidencias cuando los intereses y los campos de atribuciones se cruzan generando en muchos casos problemas que atentan directamente contra la conservación de zonas protegidas<sup>26</sup>. A pesar de ello, se han llevado a cabo múltiples acciones basadas en proyectos y convenios internacionales para restaurar, conservar y proteger cuencas hidrográficas y zonas de interés ecológico.

Francke (2003) plantea una serie de medidas que comenzaron en los años 90 con el fin de establecer políticas de manejo de cuencas tales como cooperación técnica internacional, formulación de proyectos, promulgación de leyes y capacitación

---

<sup>25</sup> Esto puede reflejarse en la sequía que actualmente azota al valle de Petorca en la región de Valparaíso en la zona central de Chile. El gobierno ha invertido montos millonarios para paliar los estragos generados por la sequía en el sector agrícola y ganadero de pequeños y medianos propietarios a través del ministerio de agricultura, pero las soluciones han sido sectorizadas y no integrales por lo que el problema persiste y la sequía se ha intensificado los últimos 10 años. Este problema persiste debido a que la Constitución de 1980 redactada durante la dictadura del General Augusto Pinochet consagró la propiedad privada por sobre el interés público privatizando las aguas siendo entregadas a perpetuidad a las empresas hidroeléctricas. El agua en Chile, por tanto, tienen la categoría de bien privado transable en el mercado. Al ser privadas, el gobierno no puede utilizarlas para fines públicos ni distribuir las en periodos de sequía.

<sup>26</sup> Prueba de ello es la prospección minera efectuada en el Parque Nacional Lauca en la zona norte de Chile. Por ser un parque nacional no se puede hacer explotación de ningún recurso que se encuentre en él, pero las leyes de conservación quedan supeditadas al código minero cuya fuerza legal es mayor que las leyes conservacionistas.

permanente<sup>27</sup> entre otros. Los planes se han centrado básicamente en protección de la biodiversidad, recuperación de suelos y disminución de las zonas erosionadas. A pesar de esto no ha existido en Chile (a diferencia de otros países) una transferencia tecnológica a gran escala a los pequeños y medianos propietarios sobre técnicas específicas de conservacionismo. El mismo autor (Francke, et al, 2008) indica que a pesar de los esfuerzos realizados no existe una norma taxativa que proteja recursos específicos como por ejemplo, el suelo. Las técnicas aplicadas en Chile son generalmente muy invasivas y de alto costo (como por ejemplo remoción) debido al hecho de necesitar resultados en forma inmediata<sup>28</sup>, sin embargo, la necesidad de implementar medidas amigables con el medio ambiente es algo que cada vez toma mayor significación sobre todo en zonas donde el suelo está fuertemente afectado por actividades antrópicas; por ejemplo, Muenya y colaboradores (2010) hacen ver el impacto generado en los suelos de la zona central de Chile en el valle de Puchuncaví y Ginocchio (2000) hace alusión a lo deteriorado que están los suelos por metales pesados en lugares con alta actividad minera.

Los suelos en Chile se caracterizan por ser muy diversos debido a una conjunción de factores entre los cuales destacan la latitud (suelos desérticos en el norte con escasa lluvia y baja o nula materia orgánica y sujetos a una fuerte radiación solar y suelos con altas lluvias –sobre los 1000 mm anuales– y una alta materia orgánica en la zona sur), vegetación, suelos costeros y de secano interior cercanos a la Cordillera de los Andes, etc... además y debido a la torrencialidad de los ríos que bajan de la Cordillera (sumado a la deforestación) la erosión es uno de los principales factores que limitan la entrega de bienes y beneficios por parte de este recurso. Por ello la mayoría de las investigaciones en Chile se han centrado en aspectos que aumenten la producción y limiten la erosión.

Respecto de la fijación de carbono, nace como una externalidad para paliar los efectos de los GEI y contribuir a la disminución del efecto invernadero y por ende a evitar el calentamiento del planeta con las consecuencias que ello traería. Esto se ha estudiado bastante en los ecosistemas forestales y en muchos casos con una visión de orden económico debido a los bonos de carbono que se popularizaron después del protocolo de Kioto (lo que se denominó “mecanismos de desarrollo limpio”) motivo por el cual Gutiérrez y Lopera (2010) explican las numerosas plantaciones de *Pinus patula* en muchas zonas de Colombia principalmente en Antioquia. Por ello, determinar las reservas de carbono en las diferentes matrices ha sido fundamental para profundizar en el ciclo de este elemento. Contrariamente a lo que se pudiera pensar, las mayores reservas de carbono en el suelo se localizan en las zonas polares, esto debido a la baja movilidad de este elemento debido a la baja presencia de vegetales lo que ha hecho que este elemento se haya acumulado por milenios en el suelo sin entrar en interacción como en un bosque tropical o templado. A diferencia de otros lugares del mundo, la fijación de carbono en Chile ha tenido un estudio de índole académico y como una externalidad de la restauración ambiental y no como un negocio con fuertes inversiones empresariales, salvo, estudios conducentes a medir la huella de carbono en sectores urbanos y la captura en plantaciones y bosques con especies nativas.

---

<sup>27</sup> Prueba de ello es el convenio CONAF – JICA – AGCI, en el cual, Japón subvenciona anualmente a CONAF para que lleve a cabo una capacitación a profesionales de toda América latina que se desempeñen en el área ambiental y forestal para aprender los lineamientos básicos en el manejo de cuencas hidrográficas con diferentes énfasis (gestión rural, cambio climático, etc...)

<sup>28</sup> El logro de objetivos en forma inmediata sobre todo en aspectos que involucren factores económicos es algo propio de los países en desarrollo sobre todo en América latina debido a la necesidad de clase política para mantener la estabilidad social, posicionarse en el poder y aumentar el PIB.

## 2.4. BIBLIOGRAFIA ESPECÍFICA

ARAYA, Juan. Suelos urbanos contaminados por hidrocarburos. Tesis (Máster en Gestión ambiental y ordenamiento territorial). Santiago de Chile. Universidad de Barcelona – Universidad Tecnológica Metropolitana, Facultad de geografía, 2009. 257 pags.

AYDINALP, Cumhur y Fitzpatrick, Ewart. Classification of great soil groups in the east black sea basin according to international soil classification systems, en: *Journal of Central European Agriculture*. 5 (2): 119 – 126. 2004.

BAETTIG, Ricardo; Yáñez, Marco & Albornoz, Marta. Cultivos dendroenergéticos de híbridos de álamo para la obtención de biocombustibles en Chile: estado del arte. *Bosque* 31(2): 89-99. 2010

BASCUÑÁN, Francisco Crecimiento urbano y balance de CO<sup>2</sup> en la cuenca del río Elqui (Chile). *Bosque* 31(2): 109-116. 2010

BATLLORI, Alicia. Los problemas ambientales del estado de Morelos: la educación como parte de la solución, en: revista *Gaceta Ecológica*, Instituto Nacional de Ecología. N° 61: 47-60. 2001.

BERHANU, Belete; Melesse, Assefa and Seleshi, Yilma. GIS-based hydrological zones and soil geo-database of Ethiopia. *Catena*, 104: 21–31. 2013

BORIE, Fernando; Rubio, Rosa y Morales, Alfredo. Arbuscular mycorrhizal fungi and soil aggregation. *J. Soil Sc. Plant Nutr.* 8 (2): 9-18. 2008

BREMENFELD, S; Fiener, P and Govers, G. Effects of interrill erosion, soil crusting and soil aggregate breakdown on in situ CO<sub>2</sub> effluxes. *Catena*, 104: 14–20. 2013

CÁRDENAS, Estrella; Bustamante, Álvaro; Espitia, José & Martínez, Andrés. Productividad en materia seca y captura de carbono en un sistema silvopastoril y un sistema tradicional en cinco fincas ganaderas de piedemonte en el departamento de Casanare. *Rev. Med. Vet.* N° 24: 51-57. 2012

CARTES, Paula; Jara, Alejandra; Demanet, Rolando and Mora, María. Urease activity and nitrogen mineralization kinetics as affected by temperature and urea input rate in southern chilean andisols. *J. Soil Sc. Plant Nutr.* 9 (1): 69 – 81. 2009.

CARVAJAL, Luís y Roldán Ernesto. Calibración del modelo lluvia-escorrentía agregado GR4J aplicación: cuenca del río Aburrá, en: revista *Dyna. Universidad Nacional de Colombia*. 74 (152): 73-87. 2007

CARVAJAL, Andrés; Feijoo, Alexander; Quintero, Heimar & Rondón, Marco. Carbono orgánico del suelo en diferentes usos del terreno de paisajes andinos colombianos. *J. Soil. Sci. Plant Nutr.* 9(3): 222-235. 2009

CASANOVA, Manuel & Benavides, Carlos. Cartografía de las pérdidas potenciales de n-urea por volatilización en suelos de Chile central. *R.C.Suelo Nutr. Veg.* 9 (1): 14-25. 2009.



CHANG, F and CHEN Y. A counterpropagation fuzzy-neural network modeling approach to real time streamflow prediction. *Journal of Hydrology*, 5: 153-164. 2001.

CONAF. Congreso de cuencas hidrográficas (2009, Quito, Ecuador), Propuesta de planificación y gestión ambiental integrada de cuencas hidrográficas, provincia de Chimborazo, Ecuador. Corporación Nacional Forestal, 2009.

CORTES, Amparo. *Los suelos contaminados y su gestión*. Barcelona, España. Editado por el Departamento de productos naturales, Biología vegetal y edafología. Universidad de Barcelona. 2007. 184 págs

COTLER, Helena; Priego, Ángel, Rodríguez, Claudia y Enríquez, Carlos. Determinación de zonas prioritarias para la eco-rehabilitación de la cuenca Lerma-Chapala, en: revista: *Gaceta ecológica*, Instituto nacional de ecología. Nº 71: 79-92. 2004

CUBERO, J & Rojas, S. Fijación de carbono en plantaciones de *Gmelina arborea*, *Tectona grandis* y *Bombacopsis quinata* en los cantones de Hojancha y Nicoya. Tesis (Licenciatura en ciencias forestales) Guanacaste, Costa Rica. Universidad Nacional, 1999. 93 págs.

DE PETRE, Antonio; Karlin, Ulf; Ali, Sergio; Reynero, Natalia. Alternativas de sustentabilidad del bosque nativo del espinal: Área captura de carbono. Proyectos de investigación aplicada a los recursos forestales nativos. Argentina Banco Mundial - Nº 4085-AR. Secretaria del ambiente y desarrollo sustentable de Argentina. 2004. 15 págs.

DEC, Dorota; Dörner, José and Horn, Rainer. Effect of soil management on their thermal properties. *J. Soil Sc. Plant Nutr.* 9 (1): 26-39. 2009

DONOSO, Pablo & Otero, Luis. Hacia una definición de país forestal: ¿Dónde se sitúa Chile? *Bosque* 26(3): 5-18. 2005

DÖRNER, José; Dec, Dorota; Peng, Xinhua and Horn, Rainer. Effect of Land Use on Structural Stability and Pore Functions of an Andisol (Typic Hapludand) in Southern Chile. *J. Soil. Sci. Plant Nutr.* 9(3): 190-209. 2009

DRAKE, Fernando; Emanuelli, Patricio & Acuña, Eduardo. *Compendio de funciones dendométricas del bosque nativo*. 1ª edición, Santiago de Chile, editado por la Corporación nacional forestal (CONAF) y la Sociedad alemana de cooperación técnica (GTZ), 2003, 196 págs.

DRINKWATER, L and Snapp, S. Nutrients in Agroecosystems: rethinking the management paradigm. *Advances in Agronomy* 92, 163-186. 2007.

EJAZ QURESHI, M; Whitten, Stuart, Mainuddin, Mohammed, Marvanek, Steve and Elmahdi, Amgad. A biophysical and economic model of agriculture and water in the Murray-Darling Basin, Australia. *Environmental Modelling & Software*. 41: 98–106. 2013.

EL KATEB, Hany; Zhang, Haifeng; Zhang, Pingcang and Mosandl Reinhard. Soil erosion and surface runoff on different vegetation covers and slope gradients: A field experiment in Southern Shaanxi Province, China. *Catena* 105: 1–10. 2013.

FLORES, H; Ramírez, H; Byerly, K; Ruiz-Corral, J; Martínez-Sifuentes, J; Díaz-Mederos, P y Alemán-Martínez, V. Estimación de escurrimiento superficial en la cuenca El Jihuite, México, en: revista *Terra Latinoamericana*, Universidad Autónoma Chapingo. 21 (3): 389-400. 2003.

FONSECA, William; Alice, Federico & Rey, José. Modelos para estimar la biomasa de especies nativas en plantaciones y bosques secundarios en la zona Caribe de Costa Rica. *Bosque* 30(1): 36-47. 2009

FRANCKE, Samuel; Yoma, Ricardo; Carnieletto, Celso; Rivera, Hugo y Nakagawa, Mamoru. Informe técnico de la contribución de conaf a la estrategia nacional de cuencas, editado por CONAF. Santiago de Chile. 2008, 72 pags.

FRANCKE, Samuel. La situación del manejo integral de cuencas hidrográficas en Chile. Documento Técnico. Programa Nacional de Manejo de Cuencas Hidrográficas y Conservación de Suelos. Corporación Nacional Forestal. Santiago, Chile, 2003. 30 pags.

FRANCKE, Samuel. En: Corporación nacional forestal (2009, Santiago, Chile). Informe técnico misión Ecuador. Santiago, Chile, 2009. pp. 2 – 19.

FU, Ba; Wang, Y; Xu, P. and Yan, K. Mapping the flood mitigation services of ecosystems – A case study in the Upper Yangtze River Basin. *Ecological Engineering*. 52: 238– 246. 2013.

GASPARI, Fernanda; Rodríguez, Alfonso and Senisterra, Gabriela. Estimation of soil erosionability in the stream basin of Pillahuinco Grande, province of Buenos Aires, Argentina. En revista: *Ciencia e investigación agraria*. Facultad de ciencias agrarias y forestales, Universidad Nacional de la Plata. 35(1):43-52. 2009.

GAYOSO, José & Schlegel, Bastienne. Una iniciativa que puede ayudar al manejo forestal sustentable y una oportunidad de negocio para Chile. *Ambiente y Desarrollo*, 14(3): 70 – 76. 1998.

GAYOSO, Jorge & Guerra, Javier. Contenido de carbono en la biomasa aérea de bosques nativos en Chile. *Bosque* 26(2): 33-38. 2005

GEBREMICAEL, T; Mohamed, Y; Betrie, G; Van der Zaag, P and Teferi, E. Trend analysis of runoff and sediment fluxes in the Upper Blue Nile basin: A combined analysis of statistical tests, physically-based models and landuse maps. *Journal of Hydrology*, 482: 57–68. 2013

GINOCCHIO, R. Effects of a copper smelter on a grassland community in the Puchuncaví Valley, Chile. *Chemosphere*. 41: 15-23. 2000

GIRALDO, L; Zapata, M & Montoya, E. Captura y flujo de carbono en silvopastoreo con bovinos en el trópico colombiano. *ITEA, Producción animal*. N° 28: 266 – 368, 2007

GONZÁLEZ, Aníbal; Palacios, Oscar; Palacios, Enrique; Chávez, Jesús y Springall, Rolando. Planificación de los recursos hidráulicos con fines de riego en la zona andina del Ecuador. En. *Revista Agrociencia* Colegio de Postgraduados. 35 (1): 1-12. 2001.

GRANATSTEIN, D and Bezdicek, D. The need for a soil quality index: Local and regional perspectives. *American Journal of Alternative Agriculture* N° 7: 12-16. 1992

HERNÁNDEZ, Marcela; Morgante, Verónica; Flores, Cecilia; Villalobos, Patricio; González, Myriam; Miralles, Pola; Dinamarca, Alejandro & Seeger, Michael. Modern approaches for the study of s-triazine herbicide bioremediation in agricultural soils. *J. Soil Sc. Plant Nutr.* 8 (2): 19-30. 2008

HOLGUIN-GONZALEZ, Javier; Boets, Pieter, Alvarado, Andrés, Cisneros, Felipe, Carrasco, Maria, Wyseure, Guido, Nopens, Ingmar y Goethals, Peter. Integrating hydraulic, physicochemical and ecological models to assess the effectiveness of water quality management strategies for the River Cuenca in Ecuador. *Ecological Modelling* 254: 1– 14. 2013

HUANG, Jun; Wu, Pute and Zhao, Xining. Effects of rainfall intensity, underlying surface and slope gradient on soil infiltration under simulated rainfall experiments. *Catena*, 104: 93–102. 2013.

HUBE, Carlos; Urrutia, Jorge; Ravanal, Carlos; Venegas, Andrés; Cruz, Pablo; Honeyman, Pablo & Schulze, Carlos. *Modelo de gestión forestal para el uso sustentable de los bosques mediterráneos chilenos*. Santiago de Chile, editado por Centro de Investigación Oterra, 2008, 114 págs.

JAUREQUI, Pedro. Fundamentos de la educación ambiental. Magíster en educación ambiental. Facultad de ciencias naturales y exactas, Universidad de Playa Ancha de Ciencias de la Educación. 1ª edición, 2002. 130 pags.

KELLER, D and Brummer, E. Putting food production in context: toward a postmechanistic agricultural ethic. *BioScience*. N° 52: 264-271, 2002.

KINOTI, Jeniffer; Su, Zhongbo and Woldai, Tsahaei. Using satellite remote sensing to assess evapotranspiration: Case study of the upper Ewaso Ng'iro North Basin, Kenya. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 12: 100–108. 2010

LEITA, L; De Nobili, L; Mondicini, M; Muhlbachova, G; Marchiol, L; Bragato, G and Contin, M. Influence of organic and inorganic fertilization on soil microbial biomass, metabolic quotient and heavy metal bioavailability. *Biology and Fertility of Soils* 28, 371-376. 1999

LITTLE, Cristian & Lara, Antonio. Restauración ecológica para aumentar la provisión de agua como un servicio ecosistémico en cuencas forestales del centro-sur de Chile. *Bosque*, 31(3): 175-178. 2010

LIU, S; Dong, Y; Li, D; Liu, Q; Wang, J. and Zhang, X. Effects of different terrace protection measures in a sloping land consolidation project targeting soil erosion at the slope scale. *Ecological Engineering*, 53: 46– 53, 2013

MAESTRE-VALERO, J; Martínez-Granados, D; Martínez-Álvarez, V and Calatrava, J. Socio-Economic Impact of Evaporation Losses from Reservoirs Under Past, Current and Future Water Availability Scenarios in the Semi-Arid Segura Basin. *Water Resour Manage*, 27:1411–1426. 2013

MALDONADO, Belinda; Caballero, Javier; Delgado-Salinas, Alfonso and Lira, Rafael. Relationship between use value and ecological importance of floristic resources of seasonally dry tropical forest in the balsas river basin, México. *Economic botany*, 67(1): 17–29. 2013

MARTÍNEZ, Eduardo, Fuentes, Juan & Acevedo, Edmundo. Carbono orgánico y propiedades del suelo. *J. Soil Sc. Plant Nutr.* 8 (1): 68-96. 2008

MATHER, Alexander; Hill, Gary, Nijnik, María. Post-productivism and rural land use: cul de sac or challenge for theorization?. En: *Journal of Rural Studies* N° 22: 441–455. 2006.

MEKI, Manyowa; Kemanian, Armen; Potter, Steven; Blumenthal, Jürg; Williams, Jimmy and Gerik, Thomas. Cropping system effects on sorghum grain yield, soil organic carbon, and global warming potential in central and south Texas. *Agricultural Systems* 117: 19–29. 2013

MÉNDEZ, M., Glenn, E., Maier, R. Phytostabilization potential of quailbush for mine tailings: Growth, metal accumulation and microbial community changes. *Journal of Environmental Quality* 36: 245-253. 2007

MINTEGUI, J; Robredo, J; García, J y López, C. Introducción a la restauración hidrológicos-forestal de cuencas hidrográficas. En: revista *Ecología* N° 20:389-414. 2006.

MORA, Orlando; Gómez, Hecdy y Milla, Manuel. Evaluación del proceso de conservación y manejo de la cuenca alta del río Yaracuy. Estado Yaracuy. II Análisis económico. En: revista *Bioagro*, Universidad Centro-Occidental Lisandro Alvarado. 15 (3): 165-171. 2003.

MORITSUKA, N; Nnishikawa<sup>1</sup>, T; Yamamoto, S; Matsui, N; Inoue, H; Kun-Zhi, Li and Inamura, T. Changes in Soil Physicochemical Properties Following Land Use Change from Paddy Fields to Greenhouse and Upland Fields in the Southeastern Basin of Dianchi Lake, Yunnan Province, China. *Pedosphere* 23(2): 169–176, 2013

MUENA, Victoria; González, Isabel y Neaman, Alexander. Efectos del encalado y la fertilización nitrogenada sobre el desarrollo de *Oenothera affinis* en un suelo afectado por la minería del cobre. *R.C. Suelo Nutr. Veg.* 10(2): 102 – 114. 2010

PILON-SMITHS, E. Phytoremediation. *Annual Review of Plant Biology* 56: 15-39. 2004

PLAZA, Juan. Territorio, geografía rural y políticas públicas. Desarrollo y sustentabilidad en las áreas rurales. En: *Boletín de la A.G.E.* Departamento de Geografía Universidad de Salamanca N° 41. 69-95. 2006.

PRASUHN, Volker; Liniger, Hanspeter; Gisler, Simon; Herweg, Karl; Candinas, Anton and Clément, Jean-Pierre. A high-resolution soil erosion risk map of Switzerland as strategic policy support system. *Land Use Policy*, 32: 281– 291. 2013

QUINTERO, María. Características fundamentales de las políticas ambientales: el riesgo y la incertidumbre. En: revista *Aportes* N° 29: 107 – 120, 2005.

RIENZI, Eduardo; Maggi, Alejandro; Navone, Stella, Pía y Clara, Movia. Factores que regulan la erosión hídrica en la cuenca del río Santa María, provincia de Catamarca, Argentina. En: revista *Terra Latinoamericana*, Universidad Autónoma Chapingo. 17 (1): 45-50. 1999

RODRIGUEZ, Liliana. Protocolo de Kyoto: Debate sobre ambiente y desarrollo en las discusiones sobre cambio climático. *Gestión y ambiente*, 10 (2): 119 – 128, 2007.

ROJAS, Alejandro. Consideraciones filosóficas, políticas y jurídicas de la regulación del medio ambiente. En: *Medio ambiente en desarrollo*. Ricardo Katz y Gabriel del Fávero, editores, Santiago de Chile. Centro de estudios públicos. 1993. 62 – 102.

RONCAL-GARCÍA, Sandra; Soto, Lorena; Castellanos, Jorge; Ramírez, Neptali & De Jong, Bernardus. Sistemas agroforestales y almacenamiento de carbono en comunidades indígenas de Chiapas, México. *Interciencia*, 33(3): 200 – 206. 2008.

RUIZ-COLMENERO, M; Bienes, R, Eldridge, D and Marques, M. Vegetation cover reduces erosion and enhances soil organic carbon in a vineyard in the central Spain. *Catena*. 104: 153–160. 2013

SANHUEZA, C y Villavicencio, G. Influencia de la cohesión aparente generada por raíces sobre la estabilidad de un talud natural en las dunas de Reñaca. *Revista de la Construcción*, 11 (1): 16 – 31. 2012

SEGNALINI, M, Bernabucci, U, Vitali, A; Nardone, A and Lacetera, N. Temperature humidity index scenarios in the Mediterranean basin. *Int J Biometeorol*: 57:451–458. 2013

SRIDHAR, Venkataramana; Jin, Xin and Jaksa, W. Explaining the hydroclimatic variability and change in the Salmon River basin. *Clim Dyn*, 40:1921–1937. 2013

TA, Wanquan, Jia, Xiaopeng and Wang, Haibing. Channel deposition induced by bank erosion in response to decreased flows in the sand-banked reach of the upstream Yellow River. *Catena* 105: 62–68. 2013

TAYE, M and Willems, P. Influence of climate variability on representative QDF predictions of the upper Blue Nile Basin. *Journal. Hydrology*. 411, 355–365. 2012

TRASAR-CEPEDA, Carmen; Leirós, María and Gil-Sotres, Fernando. Modification of biochemical properties by soil use. *J. Soil Sc. Plant Nutr*. 8 (2): 53-60. 2008

UPADHYAY, Ranjit Kumar; Raw, S; Roy, P and Rai, Vikas. Restoration and recovery of damaged eco-epidemiological systems: Application to the Salton Sea, California, USA. *Mathematical Biosciences*, 242: 172–187, 2013

URRUTIA, Osvaldo. El régimen jurídico internacional del cambio climático después del “Acuerdo de Copenhague”. *Revista de Derecho de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso*. N° 34: 597 – 633. 2010

VIAL, Gonzalo. *Historia de Chile*. 2ª Edición, Vol 1, Tomo 1. Santiago de Chile, editorial Santillana, 1981, 424 págs.

VILLA, Alexis; Mourgues, Víctor; Yáñez, Armando; Cunazza, Claudio y Mella Eliécer. Plan de manejo reserva nacional Federico Albert. Santiago de Chile. Editado por la Corporación Nacional Forestal (CONAF). 1995, 87 págs.

VILLEE, Claude; Solomon, Eldra; Berg, Linda; Martin, Diana. *Biología*. 4ª edición, México, D.F. Editado por Mc Graw Hill Interamericana, 1998, 1306 págs.

WALLIS, Philip; Ison, Raymond and Samson, Katelyn Identifying the conditions for social learning in water governance in regional Australia. *Land Use Policy* 31: 412– 421. 2013

WANG. Bin; Zheng, Fenli; Römkens, Mathias and Darboux, Frédéric. Soil erodibility for water erosion: A perspective and Chinese experiences. *Geomorphology* 187: 1–10. 2013

WASIGE, John; Groen, Thomas, Smaling, Eric and Jetten, Victor. Monitoring basin-scale land cover changes in Kagera Basin of Lake Victoria using ancillary data and remote sensing. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 21: 32–42. 2013.

WONG, M.H. Ecological restoration of mine degraded soils, with emphasis on metal contaminated soils. *Chemosphere* 50: 775-80. 2003

XIE, Hua and Lian Yanqing. Uncertainty-based evaluation and comparison of SWAT and HSPF applications to the Illinois River Basin. *Journal of Hydrology*, 481: 119–131. 2013

XU, Yue-Ping; Zhang, Xujie; Ran, Qihua and Tian, Ye. Impact of climate change on hydrology of upper reaches of Qiantang River Basin, East China. *Journal of Hydrology*, 483: 51–60. 2013

YERENA, José; Jiménez, Javier; Aguirre, Oscar; Treviño, Eduardo. Contenido de carbono total en los componentes de especies arbóreas y arbustivas en áreas con diferente uso, en el matorral espinoso tamaulipeco, en México. *Bosque* 33(2): 145-152, 2012

ZERMEÑO, Alejandro; Ríos, Jorge; Gil, José; Cadena, Martin; Villarreal, José. Dinámica del flujo de bióxido de carbono y de energía sobre un pastizal natural del norte de México. *Bioagro*, 23(1): 35 – 42. 2011.

## Web

ACOSTA, M; Etchevers, J; Monreal, C; Quednow, K & Hidalgo, C. Un método para la medición del carbono en los compartimientos subterráneos (raíces y suelos) de sistemas forestales y agrícolas en terrenos de ladera en México. [en línea]. Valdivia, Chile. Bosques Procarbono, Universidad Austral de Chile, 2001. [Fecha de consulta: 4 de julio de 2013]. Disponible en: <[http://www.uach.cl/procarbono/pdf/simposio\\_carbono/10\\_Acosta.PDF](http://www.uach.cl/procarbono/pdf/simposio_carbono/10_Acosta.PDF)>

BROWN y Ferrer. Programa de Manejo de Cuencas Hidrográficas [en línea]. Santiago de Chile. Instituto Forestal – DHV Consultants B.V. – ICSA Ltda. 2000. [Fecha de consulta: 20 de febrero de 2010]. Disponible en: <<http://www.parc.ca/mcri/pdfs/papers/gov03.pdf>>

GUTIERREZ, Víctor & Lopera, Gabriel. Valoración económica de la fijación de carbono en plantaciones tropicales de *Pinus patula* [en línea]. Valdivia, Chile. Bosques Procarbono, Universidad Austral de Chile, 2001. [fecha de consulta: 4 de julio de 2013]. Disponible en: <[http://www.uach.cl/procarbono/pdf/simposio\\_carbono/16\\_Gutierrez.PDF](http://www.uach.cl/procarbono/pdf/simposio_carbono/16_Gutierrez.PDF)>

SEMARNAT. Secretaria del medio ambiente y recursos naturales [Fecha de consulta: 9 de junio de 2013]. < <http://www.inecc.gob.mx/>>





---

## CAPITULO III

# CARACTERIZACION DEL EMPLAZAMIENTO PARA ANALIZAR

---



El principal objetivo del proyecto CONAF – JICA fue el control de erosión en suelos preferentemente forestales de la zona semiárida de Chile central. Para lograr ese objetivo fueron necesarias dos directrices iniciales: (a) manejo de cuencas con obras civiles y (b) la reforestación. Para concretar esto último era imprescindible establecer planes piloto para delinear de esa manera los ejes rectores que se debían contemplar en materia de restauración. Por lo tanto, el plan se estructuró en un sector del secano interior en la zona central del país en un lugar fuertemente afectado por deforestación y procesos erosivos. Esto no solo debido a causas naturales (lluvias, deslizamientos, etc...) sino directamente provocado por causas antrópicas, de tal manera que los resultados obtenidos fueran replicables a zonas que estuvieran afectadas por fenómenos similares.

Para concretar el proyecto CONAF – JICA, se determinó trabajar y establecer el plan de acción en el sector de Alto Loica, comuna de San Pedro de Melipilla en la Región Metropolitana debido a que en esa zona se han generado en los últimos años grandes extensiones erosionadas por el uso intensivo de la tierra y sobreexplotación de los recursos naturales. Como se trata principalmente de una zona rural, la población (con altos niveles de pobreza) ha depredado los recursos naturales (como extracción de leña, tala para reemplazar arbustos nativos por zonas de cultivo, etc...), por lo que históricamente los habitantes del sector han hecho uso pero no manejo de los recursos naturales existentes en San Pedro y alrededores.

En la subcuenca El Yali se localizaron 4 microcuencas como sitio experimental donde se instalaron los dispositivos destinados a la recuperación de suelos y vegetación en las microcuencas degradadas. La zona se delimitó y georreferenció de tal forma que las microcuencas quedaron claramente definidas territorialmente y catalogadas como microcuencas 1 a la 4.

Considerando elementos como topografía, tipo de erosión y problema específico a solucionar (cárcavas, reforestación, contención de laderas, corrección de torrentes, etc...), los dispositivos de restauración fueron instalados con patrones estandarizados, según los lineamientos del proyecto. El seguimiento, monitoreo y asistencia del equipamiento quedó a cargo de los especialistas del “Programa de manejo de cuencas hidrográficas de la zona semiárida de Chile”, dependiente de CONAF.

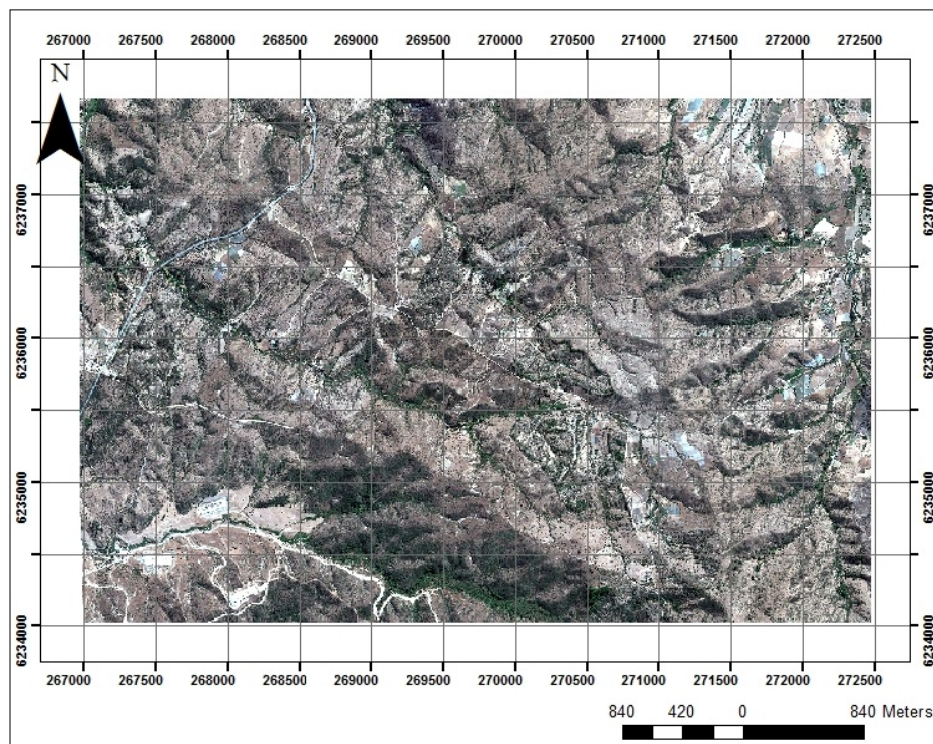
El lugar presenta características idóneas para la instalación del plan piloto, como por ejemplo, erosión, tipo de suelos (pobres en horizonte orgánico), climatología, etc...

Además de las cuencas, el proyecto original contaba con la instalación de un vivero<sup>29</sup> con la función de potenciar la reforestación de la zona. El área del proyecto se encuentra en la Cordillera de la Costa, de geografía montañosa moderada con un promedio de pendiente de 8 a 14 grados, caracterizada por sus valles pequeños desarrollados y muchos pliegues montañosos.

Para llevar a cabo las prácticas de forestación en Alto Loica se efectuó un cerco en el contorno de las microcuencas impidiéndose el ingreso de ganado a las áreas plantadas y tratadas, por lo que, junto con permitir el crecimiento de los árboles, ha permitido en los últimos 15 años que se recupere la pradera natural y la vegetación como cubierta superficial, lo que entrega un producto adicional disminuyendo la erosión y la degradación de suelos.

### 3.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA

La hoya del estero Yali se ubica entre los sectores bajos de los ríos Maipo y Rapel, extendiéndose en dirección E–NW con una longitud aproximada de casi 50 Km, desde su nacimiento a 360 msnm hasta desembocar en el mar.



**Figura 3.1. Imagen satelital del sitio de trabajo.** El sitio escogido se localiza en la Cordillera de la Costa en la Región Metropolitana. Básicamente se trata de secano interior con estaciones marcadas y amplias oscilaciones térmicas en invierno y verano. Los suelos son altamente erosionados por acción antrópica debido a la acción ganadera y tala indiscriminada. Fuente: Elaboración propia

<sup>29</sup> El vivero se encuentra en funcionamiento y se localiza a 10 minutos del pueblo de San Pedro de Melipilla. Actualmente el lugar cuenta con dependencias para alojamiento, reuniones y principalmente se aboca a la producción de flora nativa orientada principalmente a prestar servicios a instituciones públicas y privadas que requieran de servicios de reforestación en planes de compensación en EIA.

La zona de importancia hidrogeológica de esta cuenca se encuentra desde el sector medio, a la altura del pueblo El Prado (160 msnm) aguas arriba, donde el terreno se hace más plano y el valle más amplio (IPLA, 1996).

El área donde se desarrolla el proyecto y donde se encuentran las microcuenclas corresponde a la localidad de Alto Loica en la hoya del Estero Yali<sup>30</sup> (IPLA, 1986), en el extremo S-W de la Región Metropolitana, en el extremo sur de la comuna de San Pedro, de la zona central de Chile, entre los paralelos 33° 46' y 34° 04' Latitud Sur y los entre los meridianos 71° 12' y 71° 42' Longitud Oeste, a 38 Km. de distancia directa del Pacífico y a 120 Km. de Santiago. Se encuentra en la zona semiárida del secano costero interior de la zona central de Chile en la cuenca del río Maipo (Aguirre, 2009).

### 3.2. UBICACIÓN ADMINISTRATIVA

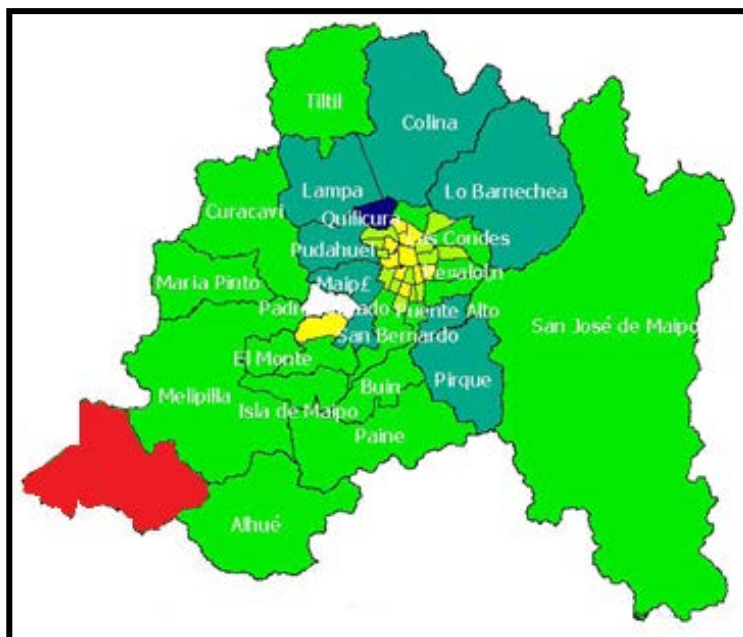
El proyecto de control de erosión se encuentra en el Sector Alto Loica que comprende 77,12 ha, en la comuna de San Pedro, provincia de Melipilla, Región Metropolitana. La comuna de San Pedro tiene una superficie aproximada de 80.000 ha, de las cuales el 99,94 % es rural y solo el 0,06 % es de carácter rural urbano. Según el Censo de Población y Vivienda realizado el año 2012 en la comuna de San Pedro había 7.549 personas (INE, 2012) repartidas en 32 localidades rurales con una densidad ocupacional 9,3 hab/km<sup>2</sup>. Es la única comuna 100 % rural de la región metropolitana<sup>31</sup>.



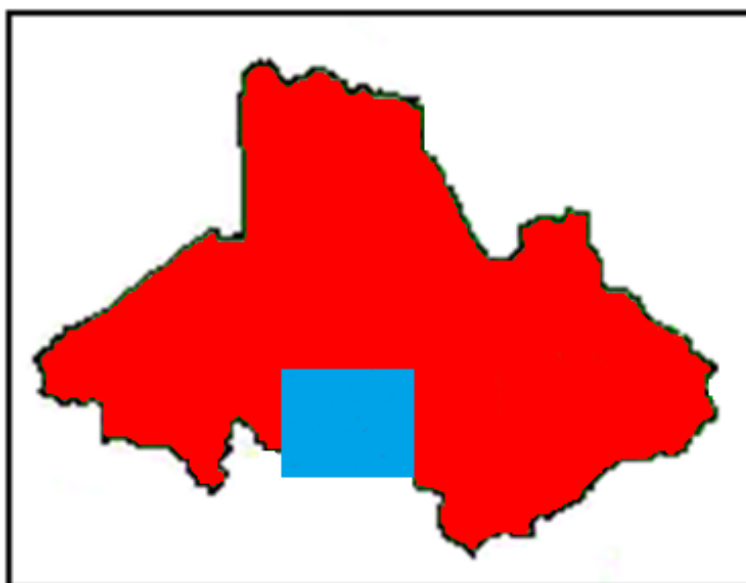
**Figura 3.2. Localización de la Región Metropolitana.** El área del proyecto se ubica en la zona central de Chile en la ciudad capital (Santiago), entre la V (Valparaíso) y VI (Libertador General Bernado O'higgins) región. Fuente: INE(a), 2005.

<sup>30</sup> La subcuenca el Yali está categorizada como la subcuenca 058 según la DGA.

<sup>31</sup> Ilustre Municipalidad de San Pedro de Melipilla



**Figura 3.3. Localización de la comuna de Melipilla en la Región Metropolitana.** La región metropolitana presenta 32 comunas, divididas en las comunas urbanas y comunas rurales. San Pedro de Melipilla (marcada con rojo en la zona inferior izquierda) se localiza al S-W de la Región Metropolitana a 38 Km. del Océano Pacífico y a 120 Km. de Santiago Centro. Fuente: INE(a), 2005<sup>32</sup>



**Figura 3.4. Área de estudio en la comuna de San Pedro de Melipilla.** El sitio de estudio está localizado al sur de la comuna de San Pedro en el sector de Alto Loica (recuadro azul) en la subcuenca El Yali, próximo al Estero Loica en zonas montañosas que no exceden los 500 msnm. Fuente: INE(a), 2005<sup>33</sup>

<sup>32</sup> Regiones 1990 – 2005. Panorama económico y social de la Región Metropolitana.

<sup>33</sup> Regiones 1990 – 2005. Panorama económico y social de la Región Metropolitana.

Limita al norte con la comuna de Melipilla, al oriente con las comunas de Melipilla y Alhué, al poniente con Santo Domingo (V región) y al sur con las comunas de Litueche, Las Cabras y Navidad (VI región) (Sanchez y Morales, 2004).

### **3.3. OROGRAFÍA**

Orográficamente se distinguen montañas bajas y relieves acolinados, con altitudes máximas de 500 msnm y pendientes que fluctúan entre 8° a 14° en promedio. Resulta posible diferenciar tres grandes zonas topográficas: un sector de lomajes suaves hacia la desembocadura de los principales esteros; valles fluviales originados por los sedimentos y finalmente un sistema de montaña baja y de colinas, que actualmente se encuentra afectado por procesos erosivos de distintos tipos y categorías. El sector esta ubicado en la Cordillera de la Costa por lo que priorizan las quebradas y las irregularidades (principalmente en el lugar de trabajo) este ha sido uno de los elementos principales (sumados al uso dado por la población) por los cuales la erosión es tan severa en este lugar (Trivelli, 2006).

### **3.4. GEOLOGÍA**

Las características geológicas de la comuna se relacionan principalmente con depósitos aluviales que datan del cuaternario y con el batolito de la costa, formación geológica que data del período paleozoico y que consiste en un complejo intrusivo constituido principalmente por tonalita y menor cantidad de adamelita y granodiorita. Los materiales constituyentes de esta unidad geológica, se encuentran en un estado de fuerte y profunda meteorización, lo que da origen al regolito, material muy abundante en la cordillera costera (Francke, 2006)

### **3.5. RELIEVE**

El relieve de la Región Metropolitana presenta tres unidades que, de oriente a poniente, son: la Cordillera de los Andes, la Depresión Intermedia y la Cordillera de la Costa. Esta configuración se habría generado durante una fase de máxima compresión ocurrida durante el Oligoceno Superior-Plioceno Medio.

San Pedro de Melipilla se localiza en el sector del colinaje costero, el cual esta en el límite con la V región y su fisonomía se presenta como un cordón compacto norte – sur que delimita con el poniente a la cuenca de Santiago, con alturas de 2000 msnm. La cordillera costera irrumpe al norte de la localidad de El Monte para permitir el paso de río Maipo con un ancho aproximado de 8 Km. para luego volver a retomar altura en los cerros Horcon de Piedra de 2070 msnm y Cantillana de 2281 msnm (Sánchez y Morales, 2004)

El colinaje costero hacia el surponiente se presenta como un relieve ondulado de alturas promedio de 400 a 600 metros originando algunas rinconadas y cuencas menores en contacto con la cordillera costera. Tal es el caso de la cordillera de Melipilla, que se comunica hacia el interior por el valle del río Maipo a través de un angosto corredor entre el Monte y Talagante; hacia el norte se prolonga a través del valle del río Puangue por un valle intermontano costero que la comunica con la cuenca de Curacaví; por último, se abre hacia el poniente siguiendo el curso inferior del río Maipo (Sanchez y Morales, 2004).





**Figura 3.5. Mapa geomorfológico de la región Metropolitana.** El territorio chileno está conformado por 4 formaciones geomorfológicas claramente definidas, la Región Metropolitana no presenta salida al mar por lo que no presenta planicies litorales como la mayoría de las regiones en Chile. San Pedro de Melipilla se localiza en la zona de las cordilleras costeras. Fuente. Inzunza, 2000.

### 3.6. SUELO

Los suelos de la Región Metropolitana son desde el punto de vista agrícola de gran productividad en el sector de la cuenca pero de baja productividad y uso eminentemente forestal en los sectores de colinaje costero (sector de Alto Loica). En la cuenca de Santiago los suelos son pardos no cálcicos generados sobre materiales aluviales (sedimentos provenientes de la cordillera de los Andes) en parte volcánicos y en parte glaciofluviales, lo cual establece una clara diferencia con los suelos de Melipilla y alrededores (Sánchez y Morales, 2004). Estos suelos estuvieron cubiertos en tiempos pasados por bosque nativo, pero en la actualidad están altamente degradados (en general todos los suelos del secano interior de la zona central) debido a su explotación altamente intensiva que los dejó expuestos a la erosión (Armesto *et al.* 2010).

El suelo se originó a partir de la evolución del material granítico, presentando un subsuelo arcilloso de lenta permeabilidad y un substrato de roca descompuesta con escasa cohesión, cuyas características favorecen el escurrimiento superficial del agua con alta susceptibilidad a la erosión.

En San Pedro los suelos predominantes son Cauquenes (CQ), Estancilla (STC), Lingolingo (LL) y Lo Vazquez (LVZ) (Francke, 2006). Los suelos de las cuencas Alto Loica se definen como la serie de suelos "Lo Vasquez" (Ciren, 1996), de textura franco arcillo arenosa, de profundidad media y muy susceptibles a la erosión (Anexo 1). La capacidad de uso se define entre VI y VII de A.P.F (aptitud preferentemente forestal), lo que implica que constituyen suelos severamente afectados por la erosión, y no son aptos para el cultivo. Este suelo se forma por la descomposición de roca granítica de origen ígneo con cuarzos y feldespatos deteriorados.



Presentan una estructura granular que afecta fácilmente el escurrimiento superficial por la intensidad de la lluvia. En condiciones secas no presenta adhesividad, sin embargo, en la capa superficial cuando se incorpora la lluvia caída aumenta la adhesividad rápidamente. En cuanto a la dureza del suelo, se encuentra en los 20 a 50 kg/cm<sup>2</sup> en el horizonte A y de 100 kg/cm<sup>2</sup> el horizonte B, aunque la compactación aumentaría considerablemente en verano (Ciren, 1996)



**Figura 3.6. Serie de suelos del sector San Pedro de Melipilla.** En San Pedro los suelos predominantes son Cauquenes (CQ), Estancilla (STC), Lingolingo (LL) y Lo Vazquez (LVZ). Los suelos de las cuencas Alto Loica se definen como la Serie de Suelos “Lo Vasquez”. Fuente: Ciren, 1996.

### 3.7. CLIMA

La principales características climáticas de la Región Metropolitana corresponden al tipo mediterráneo, de estación seca larga y con un corto invierno lluvioso. Se extiende desde la hoya hidrográfica del Aconcagua, por el norte, hasta la latitud del Itata (37° latitud sur) aproximadamente (INE(b), 2005<sup>34</sup>). La temperatura media anual es de 14° C, el mes más cálido corresponde a enero, alcanzando una temperatura media de 22° C, y el más frío a julio con 7° C. En el sector de Colina y en menor grado en la zona de Santiago, existen climas más áridos y con mayores fluctuaciones térmicas que reflejan la penetración del clima de estepa, fenómeno que se debe a la presencia de la cordillera costera relativamente alta que actúa como pantalla dificultando la penetración de las condiciones climáticas marítimas. El sello característico lo constituyen las lluvias de invierno, cuyas variaciones permiten destacar condiciones bastantes precarias alcanzando promedios anuales de 350 mm; las precipitaciones decrecen desde la costa hacia la depresión

<sup>34</sup> Informe anual sobre el Medio Ambiente

intermedia, para aumentar nuevamente en la cordillera de Los Andes, originándose de esta manera las líneas bioclimáticas generales de la región y de la zona central de Chile. Las precipitaciones presentan gran irregularidad, debido a que un año puede ser muy lluvioso y el siguiente muy seco (Anexo 2). En cuanto a la humedad relativa que se observa en esta región, en general esta decrece progresivamente desde la costa hacia el interior. La presencia de la Cordillera de la Costa y el alejamiento del mar son los principales factores que producen las características de continentalidad del clima de la región de Santiago (Inzunza, 2000)

Mes	Media Mensual	Máxima Absoluta	Mínima Absoluta	Máxima Media	Mínima Media
Enero	21,5	34,9	8,6	30,2	14,4
Febrero	20,6	36,2	10,8	29,4	14,1
Marzo	19,0	33,4	7,9	27,0	13,4
Abril	15,2	30,4	6,8	24,5	9,0
Mayo	10,4	23,8	0,0	16,3	6,7
Junio	11,1	21,6	1,4	15,4	8,3
Julio	8,7	23,4	-0,2	15,5	4,4
Agosto	10,8	25,2	1,6	16,5	7,3
Septiembre	10,9	24,2	0,8	18,0	6,0
Octubre	14,3	32,0	5,8	21,8	8,7
Noviembre	18,4	31,0	8,0	27,1	11,5
Diciembre	19,9	33,6	9,9	27,9	13,2
<b>Media Anual</b>	<b>15,1</b>	<b>36,2</b>	<b>-0,2</b>	<b>22,5</b>	<b>9,8</b>

**Tabla 3.1. Temperaturas en la cuenca de Santiago.** El sitio en estudio presenta altas oscilaciones térmicas en la relación verano – invierno, registrando temperaturas mayores a 30 grados en verano y menores a cero grados en invierno. Fuente. INE(b), 2005<sup>35</sup>.

El clima del sector Alto Loica se ubica dentro de la zona climática de influencia mediterránea del tipo Templado Mesotermal Superior Estenotérmico Mediterráneo Semiárido.

Presenta lluvias invernales y una estación seca prolongada. La influencia marítima es nula en general, excepto en el sector poniente donde resulta posible apreciar un efecto leve por parte del océano. Se caracteriza el régimen térmico por temperaturas que varían entre una máxima media en el mes de enero de 28° C y una mínima media en el mes de julio de 5° C, con una temperatura media anual de 15° C. El período libre de heladas corresponde a 244 días, con un promedio de 8 heladas por año ocurridas principalmente entre los meses de Abril y Octubre (Trivelli, 2006).

Se observan estaciones marcadas, un régimen hídrico con precipitación media anual de 310 mm, con lluvias concentradas entre los meses de mayo y septiembre, lo que genera un déficit hídrico de 1017 mm.

El viento sopla continuamente, en dirección S–W costero en otoño, con intensidad de 4 m/s como promedio, lo que ayuda a la sequía. Presenta un mejor drenaje del aire frío invernal, debido a su posición media en la cuenca determinando una atenuación térmica de este aire. Los veranos se presentan calurosos y secos. La evaporación anual se estima en 736 mm, con una evaporación diaria de 1 mm en invierno y 3,5 mm en verano,

<sup>35</sup> Informe anual sobre el Medio Ambiente

considerando una gran influencia del viento permanente para el aumento de la evaporación del área observada la que se estima en 1220 mm. por año (Trivelli, 2006)

### **3.8. HIDROLOGÍA**

En la comuna existen cuatro cuencas principales, la del estero Yali, Loica, Prado y Nihue. Se encuentran al interior de la cuenca cerrada que se forma entre los valles de los ríos Maipo por el norte y Rapel por el sur. Los esteros mencionados presentan una alimentación pluvial con cursos intermitentes, vale decir que se activan en el período otoño - invierno, prolongándose su actividad hasta la primavera

La microcuenca 2 y la microcuenca testigo se encuentran en un afluyente de la Quebrada Loica del Estero Yali. La microcuenca 1 se ubica en la parte alta de la Quebrada Nihue y la microcuenca 3 se ubica en un afluyente poniente de la Quebrada Laja. En la temporada de lluvia se genera una alta escorrentía superficial que tiende a reducirse considerablemente entre los meses de Noviembre a Marzo.

En numerosos cauces se encuentran sedimentos de maicillo, arena y arcilla, que contienen cuarzos y feldespatos producidos a partir del suelo granítico meteorizado. Por otra parte, en los cauces angostos se encuentran expuestas las rocas y bolones agudos (Trivelli, 2006).

### **3.9. VEGETACIÓN**

En la Región Metropolitana el paisaje vegetacional se caracteriza por ser predominantemente de cordillera, pero en los valles y cuencas se desarrolla la estepa de espinos (*Acacia cavens*) tanto en formaciones puras como asociadas con otras especies como boldos peumos, litres y quillay (Anexo 3).

Debido a que esta región es una de las más densamente pobladas, el paisaje natural se ha visto seriamente alterado; así en los valles y cuencas (como El Yali y microcuencas como Alto Loica), la flora nativa es muy escasa o casi inexistente, permaneciendo solo en laderas y faldeos cordilleranos (como Quebrada de Macul), sectores en que se sigue explotando intensamente para la producción de leña y carbón (Sánchez y Morales, 2004).

San Pedro de Melipilla se encuentra dentro de la zona fitogeográfica mesomórfica, correspondiendo a una formación de matorrales esclerófilos (Gajardo, 1994). En la zona se desarrolla un paisaje vegetal homogéneo constituido por arbustos altos dispersos, en que *Acacia caven* es la especie dominante. En los pequeños valles y en los lugares menos alterados se encuentran asociaciones típicas de los bosques esclerófilos. Estos últimos se localizan sobre los 400 msnm y son característicos por su follaje duro y siempre verde que necesita de una precipitación de sobre los 400 mm anuales y que además tienen la cualidad de mantener la homeostasis en las zonas de secano para la presencia de biodiversidad (Gajardo, 1994).

Además se encuentran formaciones vegetales de matorral espinoso del secano costero, el cual, representa una formación de carácter secundario, resultado del deterioro ambiental experimentado por una intensa intervención humana (Gajardo, 1994).

El análisis en terreno ha demostrado la existencia de bosques de eucaliptus utilizados en planes de reforestación forestal, pero la disminución paulatina de la capa freática ha

ocasionado que muchos de los individuos observados no lleguen a la etapa de madurez, por lo que se secan al cabo de 7 u 8 años, motivo por el cual son talados y utilizados por la población local como combustible. En las microcuencas se encuentran las siguientes especies: *Eucalyptus amaldulensis*, *Eucalyptus globulus*, *Pinus radiata*, *Cupressus arizonica*, *Casuarina equisetifolia*, *Acacia dealbata* (especies exóticas). *Quillaja saponaria*, *Maytenus boaria*, *Acacia cavens*, *Schinus polygamus* (especies nativas)

### 3.10. ÁREA DE TRABAJO

#### 3.10.1. Aspectos Generales

El área de estudio comprende cuatro microcuencas hidrográficas experimentales, incluidas en el proyecto de recuperación de suelos degradados, dirigido por el Programa de manejo de cuencas hidrográficas en la zona semiarida de Chile, dependiente de CONAF. Según el INE(b)<sup>36</sup> (2005), la descripción respecto al arbol de cuencas y características son las siguientes:

Nombre hoya	: Maipo / Rapel
Clasificación	: A
Nombre cuenca	: Maipo
Nombre subcuenca	: El Yali
Sector microcuenca	: Alto Loica
Número de microcuencas	: 4
Condición de drenaje	: Exorreica
Origen del drenaje	: Cordillera de la Costa
Régimen de alimentación	: Pluvial
Permanencia de caudales	: Interrumpido

El área de trabajo corresponde a sitios privados que fueron entregados a la CONAF para la aplicación del proyecto piloto, por lo que el sitio del proyecto no contempla ninguna figura jurídica especial que asigne protección estatal a los lugares de trabajo, aunque se pactaron ciertos compromisos por parte de los propietarios, como no dejar ingresar ganado a las áreas de trabajo, acceso directo al personal de CONAF, instalar los dispositivos de restauración ambiental que fueran necesarios y no interferir en la implementación de estos, ni en su erradicación.

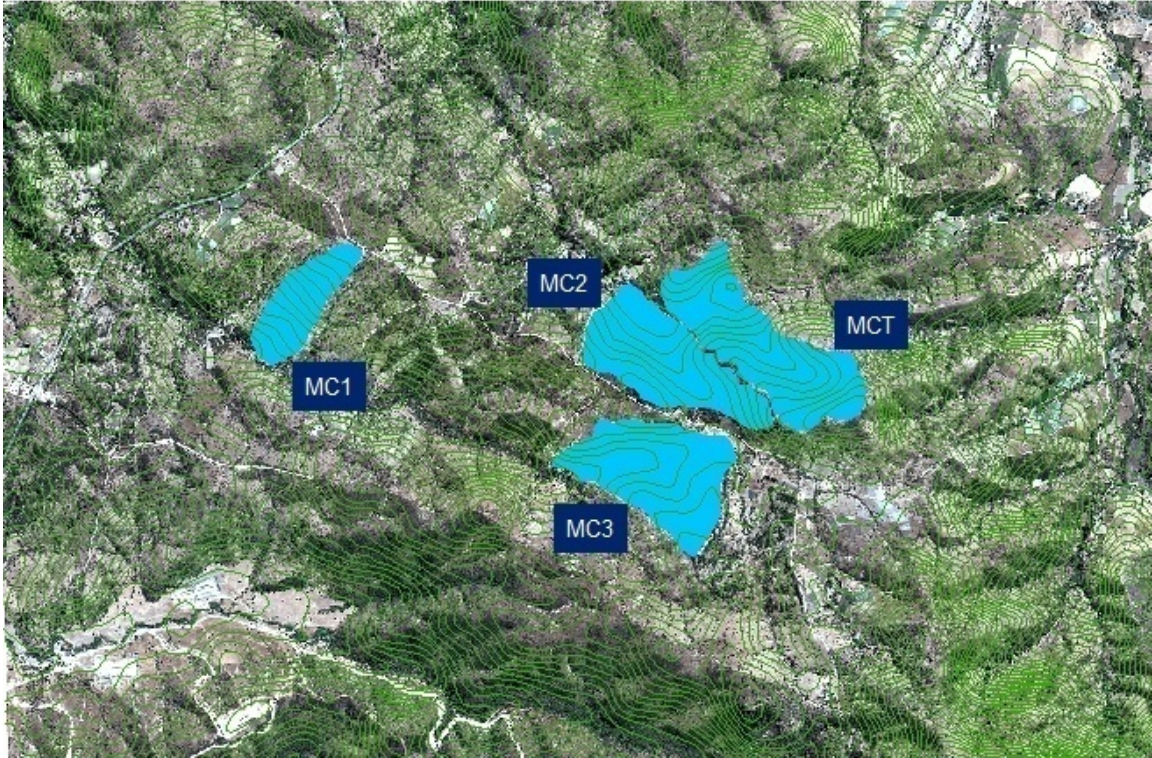
Bajo estos parámetros, el uso dado a las microcuencas es experimental, con lo cual se trata de impactar lo menos posible la vegetación del lugar. En el sitio fueron instalados los siguientes dispositivos de restauración hidrológico forestal: zanjas de infiltración, canales de desviación, muretes de sacos, gaviones, empalizadas, terrazas forestales, diques, entre otros.

Además se contempló la construcción de dispositivos que midieran la pérdida de suelo como acumuladores de sedimento e implementación de la infraestructura para medir la pérdida de suelo aplicando la USLE.

---

<sup>36</sup> Informe anual del Medio Ambiente





**Figura 3.7. Área de estudio y ubicación de las microcuencas en el sector de Alto Loica.** En 3 microcuencas se han instalado dispositivos de restauración, en cambio, en la microcuenca 4 no se ha efectuado ningún tratamiento dejándola como microcuenca de control. La figura superior muestra las ubicación de las 4 microcuencas (MC) y la figura inferior, la ubicación en el relieve de ellas (indicadas con rojo) en el sector de Alto Loica. Fuente: Elaboración propia.

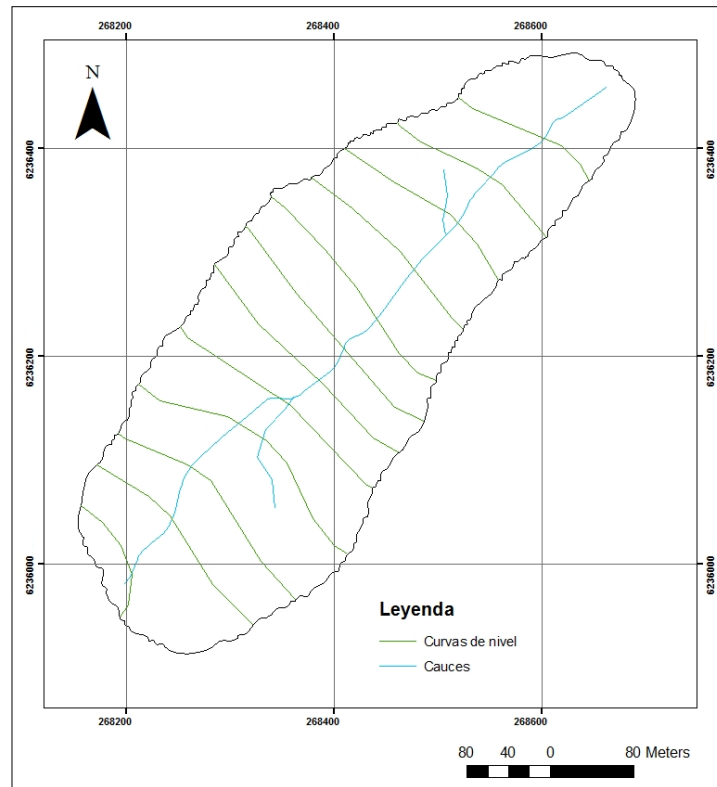
PARAMETRO	SUBPARAMETROS	MICROCUENCAS			
		1	2	3	4
<b>Tipo de cuenca</b>	Cuenca río grande				
	Subcuenca río torrente				
	Microcuenca de torrente				
	Quebradas y vertientes	X	X	X	X
<b>Tipo de cuenca forestal</b>	Nativo	X	X	X	X
	Artificial				
<b>Tipo de cuenca</b>	Cuenca río grande				
	Subcuenca de río torrente				
	Microcuencas de torrentes				
	Quebradas y vertientes	X	X	X	X
<b>Objetivo de la cuenca</b>	Producción				
	Investigación	X	X	X	X
	Uso múltiple				
<b>Cuenca según altitud</b>	Cuenca alta				
	Cuenca media	X	X	X	X
	Cuenca baja				
<b>Uso dominante de la tierra</b>	Ganadera				
	Forestal	X	X	X	X
	Agrícola				
	Uso múltiple				
<b>Régimen de tenencia de la tierra</b>	Privada	X	X	X	X
	Fiscal				
	Municipal				
<b>Régimen jurídico especial</b>	Privada	X	X	X	X
	Reserva				
	Parque Nacional				
	Santuario				
	Zona protegida				
<b>Tipología de manejo de cuencas hidrográficas</b>	Restauraron hidrológica – corrección de torrentes		X	X	
	Protección de cuencas periurbanas -				
	Protección de infraestructura				
	Manejo integral de microcuencas - recuperación de áreas degradadas	X	X	X	
	Protección de vertientes con fines hidrológicos				
	Protección según régimen jurídico especial SNASPE				

**Tabla 3.2. Caracterización general de las microcuencas de Alto Loica.** Las microcuencas corresponden básicamente a sectores de quebradas y vertientes, aunque, no cuentan con un régimen jurídico especial debido a que corresponden a terrenos privados entregados en convenio a CONAF para la implementación del programa. Fuente: Elaboración propia.

### 3.10.2. Microcuencas hidrográficas

#### Microcuenca 1

Las altitudes de la microcuenca 1 van desde los 230 a 285 msnm. Las coordenadas geográficas de la microcuenca se encuentran en geoposición otorgadas por las coordenadas 33° 59' 33" de Latitud Sur y 71° 31' 10" de Longitud Oeste. A fines de los años 90 esta microcuenca presentaba escasa cantidad de árboles y erosión de grado moderada (Trivelli, 2006). El área presenta un bosque esclerófilo degradado, acompañado de arbustos y pastos. Las coberturas más importantes comprenden a las que se encuentran en el fondo de quebradas.

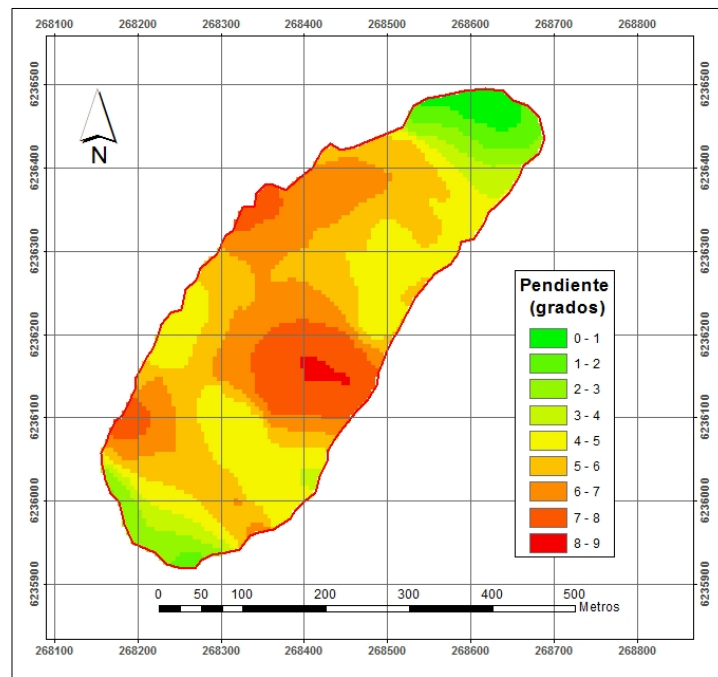


**Figura 3.8. Esquema con cauces y curvas de nivel de la microcuenca 1.** El cauce principal corre en dirección NE y cuenta con una baja red de tributarios. Cuenta con una superficie de 14 ha con altitudes que fluctúan entre los 230 a 285 msnm. Fuente: Elaboración propia.

La microcuenca presenta una forma alargada en dirección N – S, en pendiente en esta misma dirección. Una parte importante de la superficie de esta microcuenca, no cuenta con una cobertura adecuada para la protección del suelo, lo que favorece el desarrollo de procesos erosivos, especialmente lineales. En la ladera de exposición este se ha instalado zanjas de infiltración en conjunto con las cuales se ha implementado un plan de reforestación basado principalmente en pinos y eucaliptus, además de una cobertura de peumos en la zona norte como un plan destinado a implementar en la zona especies nativas con el objetivo de recuperar en parte el ecosistema que existió en el lugar. En contraposición, la ladera oeste se caracteriza por la presencia de algunas herbáceas que aparecen en la temporada de otoño e invierno, desapareciendo en los meses de verano.



En este sector se aprecian además cárcavas con erosión severa a muy severa las cuales son causantes de la emisión de sedimentos que se depositan en la parte inferior de la microcuenca, por lo que la escorrentía superficial no encuentra obstáculos en esta ladera. Sin embargo, la emisión de sedimentos es menor en la ladera este por la presencia de la vegetación y la formación de sotobosque en la zona norte de ella. Las plantaciones se han concentrado en la zona norte por motivos de acceso y pendiente, debido a que esta última es menor disminuyendo con ello la escorrentía y facilitando la implementación de obras de restauración.



**Figura. 3.9. Mapa de pendientes de la microcuenca 1.** Las pendientes de la microcuenca se encuentran entre los 3 y 8 grados, lo que favorece los procesos erosivos. Además, estos se incrementan con la pérdida de cobertura vegetal, situación que se ha revertido con la implantación de especies arbóreas. Fuente: Elaboración propia.



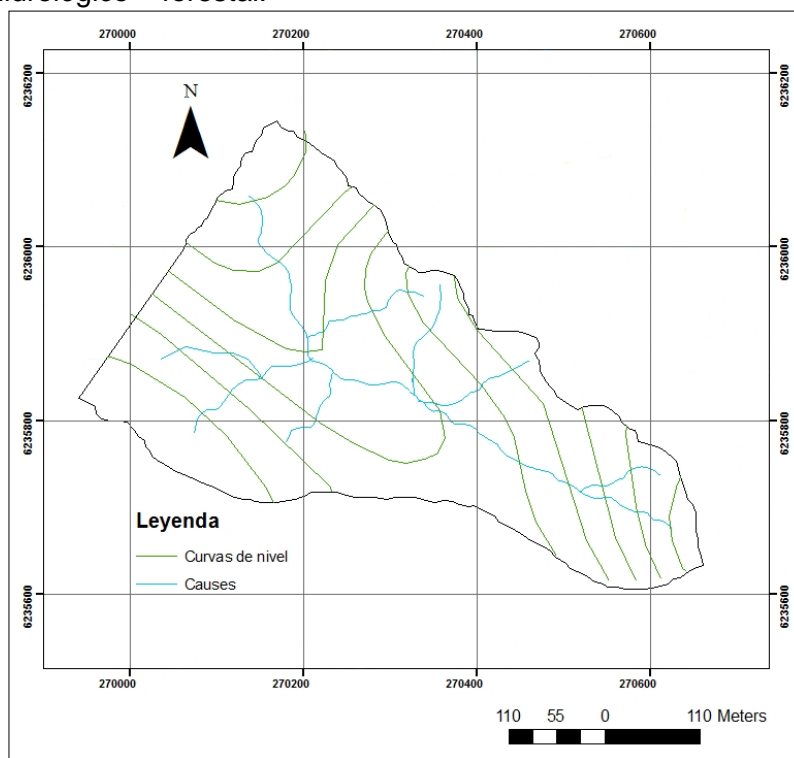
**Figura 3.10. Microcuenca 1.** En comparación a su estado en la segunda mitad de los años 90, esta microcuenca se ha recuperado paulatinamente. Aunque, quedan aún sitios por recuperar y reforestar. La obras de restauración instalada en esta microcuenca son zanjas de infiltración. Fuente: Captación propia



## Microcuenca 2

La microcuenca 2 se ubica en la posición geográfica dada por las coordenadas  $33^{\circ} 59' 31''$  Latitud Sur y  $71^{\circ} 20' 17''$  de Longitud Oeste. En el inicio de los trabajos, la microcuenca 2 presentó importantes áreas donde la erosión fue muy severa, con grandes cárcavas que pusieron en evidencia el material de origen. La erosión que predominó en las laderas se clasificó de severa a muy severa, siendo la ladera de exposición norte la que mostró un deterioro más evidente (Trivelli, 2006).

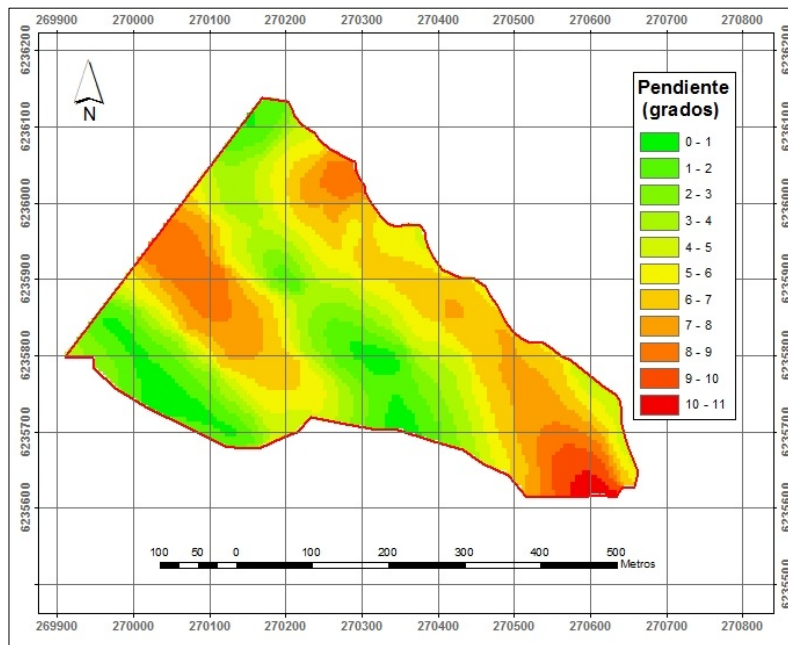
Antes del incendio era posible observar en las cárcavas de ladera este, un proceso de regeneración natural sin que se hubiese instalado en ella una obra específica ni tratamiento alguno. Esto se debió (probablemente) a la presencia de zanjas de infiltración en la zona superior de esta ladera, en cuyo sector se habían implementado estas obras en conjunto con reforestación con pinos; además en el sector medio de la ladera el control de la erosión se efectuó con la instalación de muretes con sacos en cuya parte superior se habían plantado pinos, a esto se sumó la presencia de terrazas forestales en el sector sur de esta ladera. La disminución de sedimentos producto de la reforestación y control de erosión produjo en los últimos años una disminución de la escorrentía y la formación de sotobosque principalmente con arbustos y algunas herbáceas que gradualmente habían permitido la recuperación de las cárcavas que se localizan en la parte inferior de esta ladera. De todas las microcuencas, esta fue la que mejor respondió a los procesos de restauración hidrológico – forestal.



**Figura 3.11. Esquema con cauces y curvas de nivel de la microcuenca 2.** Tiene una superficie de 17 ha y cuenta con una red de cauces mayor que la microcuenca 1. Las alturas fluctúan entre los 315 y 275 msnm. Fuente. Elaboración propia.

En la zona baja la forestación dio lugar a especies de gran tamaño (aromos, eucaliptus y arbustos, entre otros) debido a la implementación de muretes y la construcción de diques disminuyendo la escorrentía y la emisión de sedimentos. Esta microcuenca es la única en la cual se implementó un embalse para la acumulación de agua, cuyo fin inicial era la acumulación del recurso hídrico para los meses estivales. La contribución de este embalse fue fundamental para la recuperación de esta microcuenca sobre todo en las zonas aguas abajo del embalse, donde era posible encontrar no solo especies vegetales, sino, especies animales como anfibios, entre otros.

La forestación se vio complementada con la aparición de especies animales (como roedores y conejos) en una proporción comparativamente mayor a las otras microcuencas, proceso que se vio favorecido por la aparición de una mayor cobertura vegetal y masa arbórea lo que conllevó a la formación de un hábitat para micromamíferos.



**Figura 3.12. Mapa de pendientes de la microcuenca 2.** A diferencia de la microcuenca 1, esta microcuenca presenta planicies en las zonas bajas (y en sectores de las zonas altas) y extensiones con bajas fluctuaciones de pendiente, lo que ha favorecido en gran medida los procesos de restauración sobre todo en las zonas bajas favoreciendo la infiltración de agua lo que ha conllevado a la aparición de herbáceas en determinadas épocas del año. Fuente. Elaboración propia.

El gran incendio del verano del año 2012, acabó con la gran masa arbustiva y arbórea que se había producido en la microcuenca producto de reforestación que con el transcurso de los años (y el aporte de las obras hidrológica – forestales) era posible observar en el lugar; además muchas obras de restauración, principalmente los muretes de sacos en la ladera oeste, las estructuras de poste de madera (en la zona sur) y los muros de postes de madera (entre otras) fueron calcinados (la antigüedad de las obras contribuyó a su rápida combustión) por las llamas.

El incendio comenzó en la zona sur de Alto loica alcanzando rápidamente la microcuenca 3, de la cual, salto a la microcuenca 2 por el lado sur, extendiéndose a casi toda la microcuenca. El sector oeste fue consumido, excepto el sector alto de la ladera este, donde las plantaciones de pino con canales de desviación no fueron alcanzadas por las llamas. El color de la ceniza indicó una alta combustión, lo cual es coincidente con lo observado debido a la destrucción casi absoluta de los arbustos, solo los eucaliptus de copa alta quedaron en pie (aunque su tronco calcinado y parte de sus hojas superiores intactas), los pinos se quemaron al igual que los aromos, y gran parte de la flora nativa (mayten y peumos entre otros). Con el tiempo se observó en esta zona un aumento de la sedimentación en el cauce principal, situación que fue más notoria en la zona baja del cauce en el sector de la estación de aforo de la microcuenca.



**Figura 3.13. Microcuenca 2 antes del incendio.** De las 3 microcuencas en las cuales se han efectuado obras de restauración, la microcuenca 2 fue la que mejor había respondido debido principalmente a la topografía y a los dispositivos empleados. Fuente. Captación propia

El sotobosque de casi el 100 % de la cuenca resulto destruido. En las zonas altas de la ladera oeste (poblada en su mayoría por eucaliptus), las llamas no alcanzaron las copas de los árboles pero los troncos sufrieron daños a una altura aproximada de 2 metros. Si bien, el incendio en general no fue de copa, si dañó lo suficiente los árboles para impedir el normal metabolismo de estos. Las zonas bajas de la microcuenca sufrieron daños considerables (sobretudo en los sectores aledaños al cause principal, como se indicó anteriormente) destruyendo aromos, eucaliptus y zarzamoras que habían crecido cerca de dicho lugar. En los días posteriores al incendio no se observó fauna propia del lugar como anfibios, lagartijas, pajaros, etc... Las aves rapaces (muy comunes en este sector) no fueron avistadas, incluso a más de dos semanas de ocurrido el incendio.

Respecto a las obras de restauración hidrológico – forestales se registró una destrucción casi total, siendo uno de los daños más notorios y evidentes la destrucción de la estación de aforo con todo el instrumental de medición (con una pérdida económica considerable). Las 2 estaciones para medir la pérdida de suelo fueron también destruidas, al igual que muchos diques pequeños localizados en la zona sur para cauces tributarios.

Las empalizadas ubicadas en las proximidades del tranque fueron destruidas por el paso de las llamas.

Actualmente se ha visto una regeneración natural sobretodo en los eucaliptus de la zona alcanzando éstos una altura superior a los 3 metros y la restauración de las herbáceas en las zonas bajas, lo cual indica un proceso natural de recuperación de las zonas afectadas.

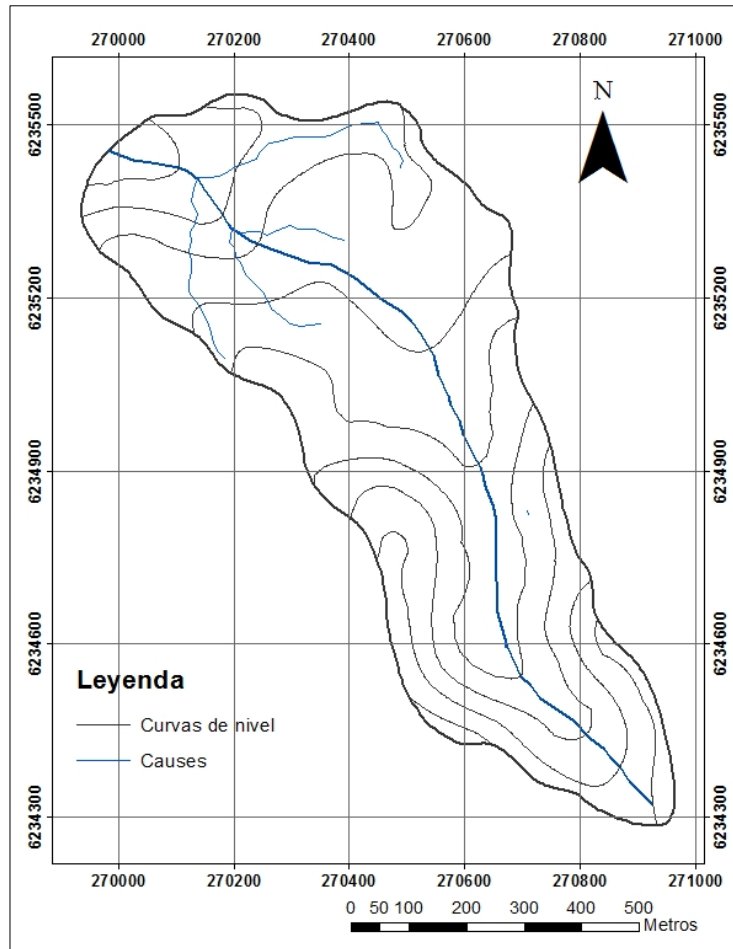


**Figura 3.14. Microcuenca 2 después del incendio.** La imagen fue captada en el mismo sector donde se captó la imagen anterior (aproximadamente un año antes) y muestra el grado de destrucción por el fuego. Tanto el sotobosque como los árboles resultaron dañados por el incendio. Fuente. Captación propia

### *Microcuenca 3*

En la microcuenca 3 las coordenadas geográficas corresponden a 33° 59' 49" de Latitud Sur y 71° 29' 18" de Longitud Oeste. En esta microcuenca predominaba la vegetación arbórea, en la cual, los eucaliptos y pinos son los individuos predominantes. A diferencia de las microcuencas anteriores, la superficie herbácea que cohabita con la vegetación leñosa era mucho menor en relación a la microcuenca 2. Esto dio origen a que la erosión fuera (y ahora aun mas) más severa en esta lugar (la escorrentía superficial y el impacto de la gota de agua son mayores en relación a las microcuencas anteriores) encontrándose cárcavas que han perdido por completo la capa fértil de suelo, incluso se aprecia en algunos lugares cárcavas con profundidades de hasta 3 metros. Esto último implica que esta microcuenca aun no logra por si sola controlar los procesos erosivos. Esto no quiere decir que los trabajos de restauración no hayan sido efectivos, sino que las coberturas principales que han aumentado y que tienen mayor relevancia corresponden a las arbóreas, por lo tanto no se ha logrado instaurar un sotobosque que permita la retención de agua e impida la acción de la gota de lluvia sobre el suelo.

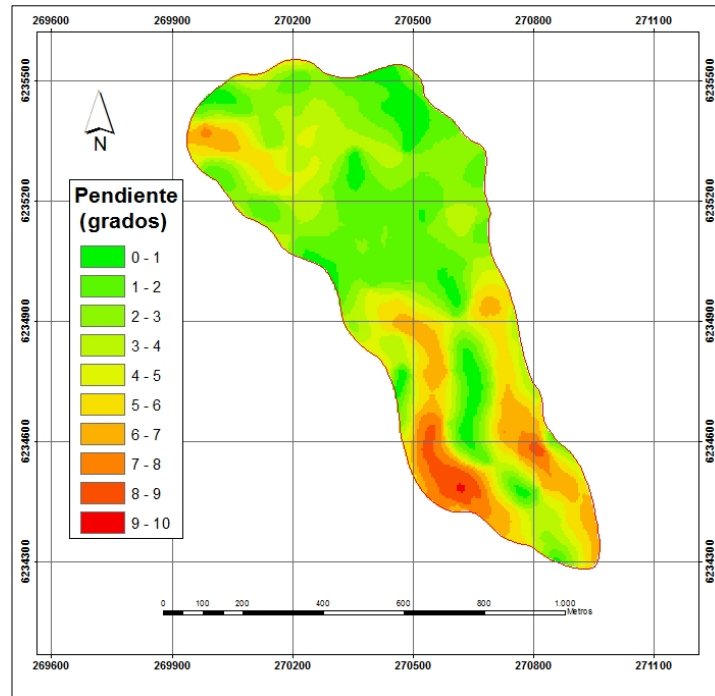
El suelo se encuentra por lo tanto con una cubierta vegetal compuesta por pinos y eucaliptus, pero descubierto en cuanto a la acción de la lluvia por no tener una capa que lo proteja directamente de la erosión por gota de lluvia.



**Figura 3.15. Esquema con cauces y curvas de nivel de la microcuenca 3.** Tiene una superficie de 56 ha. y sus alturas fluctúan entre los 320 y 275 msnm. A diferencia de las microcuencas anteriores, no existe una superficie herbácea que cohabite con la vegetación leñosa. Esto dio origen a que la erosión haya sido más severa en esta lugar. Fuente: Elaboración propia.

De los 4 lugares escogidos, esta microcuenca es la única que se encuentra habitada (vive solo una familia en el sector); las actividades desarrolladas en este lugar corresponden a la ganadería, (principalmente la crianza de ovejas), tenencia de animales de granja (caballos, gallinas, patos, entre otros), obtención de leña y carbón aprovechando los escasos arbustos y la producción de frutas y vegetales para el consumo doméstico.

Actualmente se ha desarrollado un aumento del potencial productivo de la zona implementado la pequeña agricultura basada principalmente en los cultivos de frutilla (comercializadas a comerciantes externos de la comuna) gracias a recursos obtenidos del gobierno. Las actividades agrícolas por tanto se han diversificado a una escala mayor en comparación a inicios de la década en que la producción era exclusivamente para consumo personal. La apicultura también se ha intensificado en comparación a años anteriores lográndose un aumento en la producción los últimos 3 años.



**Figura 3.16. Mapa de pendientes de la microcuenca 3.** La mayor proporción de las pendientes en la microcuenca 3 no superan los 4 grados en el sector norte, lo que indica cierta estabilidad con respecto a la presencia de quebradas y hondonadas en comparación con la microcuenca 1. Fuente: Elaboración propia.

En el lado sur de la microcuenca, predominaban los pinos, los cuales fueron calcinados por el incendio, al igual que los eucaliptus localizados en la zona norte. Debido a que la formación de una cubierta vegetal herbácea era menor en comparación a la microcuenca 2, era posible observar en esta microcuenca escorrentía superficial, la cual se intensificaba debido a la baja intercepción. En esta microcuenca se produjo la pérdida absoluta de la biomasa que formaba el escaso sotobosque que existía en este lugar. Quedando el suelo completamente expuesto a la acción de la erosión eólica e hídrica (tanto por el impacto de la gota de lluvia como por el arrastre de partículas del suelo producto de la escorrentía superficial). Esto hace suponer una mayor escorrentía para los próximos inviernos (influido también por la baja infiltración –debido a la compacidad del suelo– y la topografía), una mayor pérdida de suelo y una mayor sedimentación en los cauces, sobretodo en el principal.

En la zona norte, puede observarse la intensidad de la combustión debido al color de la ceniza, al igual que en la zona oeste donde el sotobosque y algunos espinos fueron consumidos por las llamas.





**Figura 3.17. Microcuenca 3 antes del incendio.** Esta microcuenca se caracteriza por sus laderas y áreas erosionadas (a diferencia de las anteriores). Las empalizadas y los sacos de contención eran las principales obras llevadas a cabo en este sector. Fuente: Captación propia.

En cuanto a las obras de restauración, algunos diques no sufrieron daño (solo se quemó la vegetación aledaña que por ser muy baja no los afectó). Se destruyeron parcialmente algunos muretes de sacos en la zona sur de la microcuenca y la estación de aforo no sufrió daño alguno, Sin embargo (y como puede apreciarse en la figura 3.19) el muro de poste de madera fue completamente destruido por las llamas.

En cuanto al daño global, esta microcuenca fue la mas afectada por el incendio en cuanto a extensión, quedando todo el sector norte reducido a cenizas, quemándose toda la vegetación arbórea que existía en dicho sector el cual colinda con la microcuenca 2.

En la actualidad la microcuenca se ha recuperado en cierta medida debido a la regeneración de la vegetación gracias al rebrote de las especies arbóreas y la recuperación del sotobosque en el sector norte de la microcuenca y las áreas más aledañas al cauce principal. Estos rebrotes han sido principalmente de los eucaliptus quienes ya han tomado alturas superiores a los 3 metros (situación simliar a la microcuenca 2).

Los eucaliptus en la zona han mostrado gran poder de rebrote en los árboles afectados por las llamas, considerando que los suelos son pobres el litio. Esta cualidad ha permitido la restauración paulatina de la microcuenca, aunque, en condiciones distintas a las que existían hasta antes del incendio.



**Figura 3.18. Microcuenca 3 después del incendio.** Al igual que la imagen de la microcuenca 2, esta imagen fue tomada exactamente en el mismo lugar un año después y a solo días de ocurrido el incendio. El muro de poste de madera fue calcinado al igual que el sotobosque que había alrededor; los árboles fueron destruidos aunque en algunos su copa quedó casi intacta. Fuente: Captación propia.

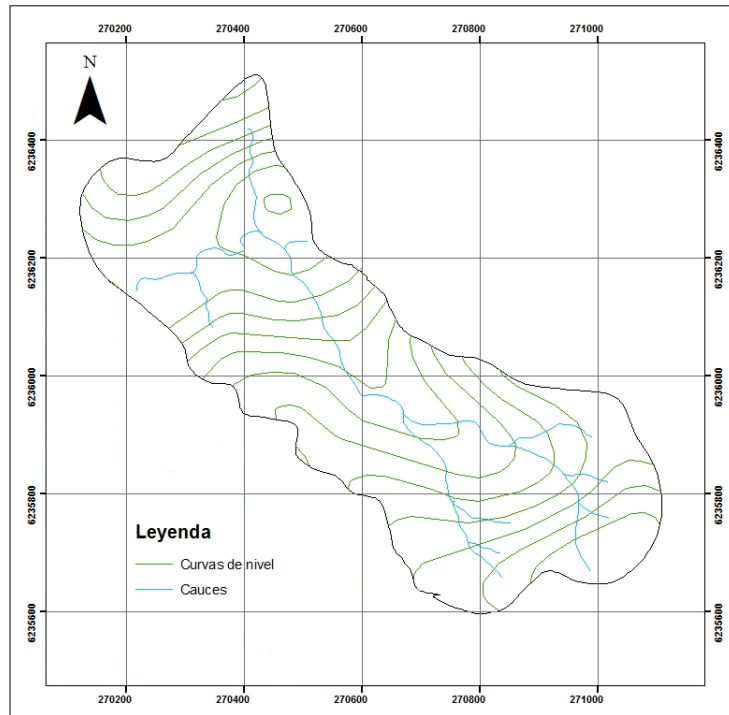
#### *Microcuenca 4*

Las coordenadas geográficas de la microcuenca 4 corresponden a 33° 59' 33" de Latitud Sur y 71° 31' 10" de Longitud Oeste. La microcuenca 4 corresponde a la cuenca testigo y se localiza en la zona NE de la microcuenca 2. Aquí no se llevó ni se lleva a cabo ningún tipo de tratamiento biológico ni mecánico. El objetivo inicial de esta microcuenca de 35 ha era no intervenir en ella y no efectuar ningún trabajo de reforestación ni tratamiento biológico ni mecánico, es decir, no se instalaría ninguna obra hidrológica forestal. Además, se habló con los lugareños (al inicio del proyecto) para que no se interviniera ya sea con animales ni con la extracción de leña.

Todo esto con el fin de servir de elemento comparativo (o microcuenca control) en relación a los trabajos efectuados en las microcuencas 1, 2 y 3 y comprobar con el paso de los años la real efectividad de las obras mecánicas y de la reforestación en la recuperación de cuencas degradadas

En esta microcuenca solo existe la vegetación nativa, encontrándose antiguos remanentes de vegetación de bosques esclerófilos en un estado avanzado de degradación. Las especies dominantes corresponden a Espinos y Romerillo, las cuales se agrupan en reducido número y en forma aislada. Como se ha señalado, en esta microcuenca no se han efectuado labores de forestación y la cobertura vegetal es insuficiente para dar protección efectiva al suelo, tanto por la baja cobertura de sotobosque que solo crece en las temporadas invernales y la casi nula vegetación arbórea existente en el área

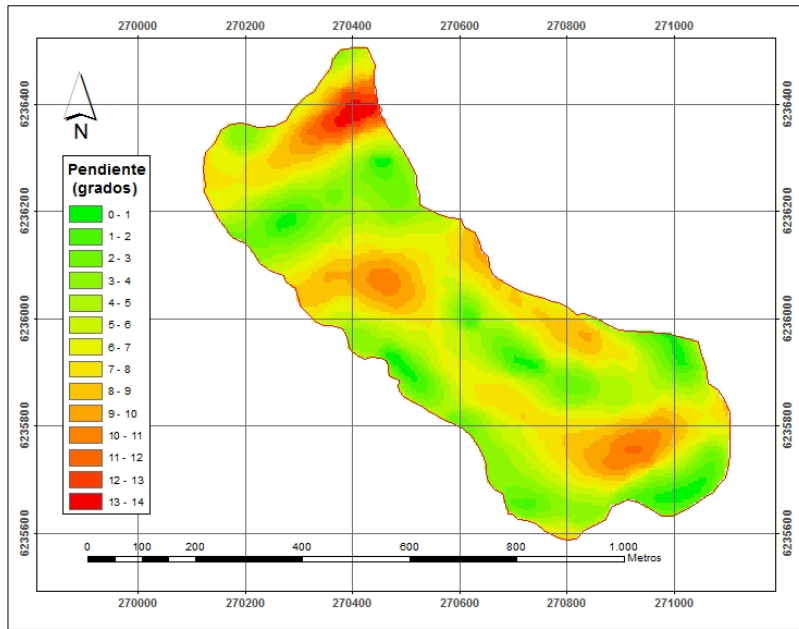




**Figura 3.19. Esquema con cauces y curvas de nivel de la microcuenca 4.** Esta microcuenca tiene una superficie de 35 ha y cuenta con alturas que van desde los 330 a los 275 msnm. La microcuenca 4 corresponde a la cuenca testigo y no se lleva a cabo ningún tipo de tratamiento biológico ni mecánico. Solo existe la vegetación nativa. Fuente: Elaboración propia.

Los bajos porcentajes de cobertura vegetacionales, explicarían los intensivos procesos de erosión presentes a nivel de cárcavas (sobre todo en la zona norte de la microcuenca). Por lo tanto, se puede decir que el 100% de la superficie de esta área no cuenta con una cubierta vegetal efectiva que pueda contrarrestar los efectos derivados de las precipitaciones y de la escorrentía superficial. La baja cobertura vegetal resulta extensible a vastos sectores de la localidad de Alto Loica.

Al igual que todo el sector de Alto Loica, esta zona fue en décadas pasadas un sector con una actividad agrícola y ganadera intensiva con fines netamente productivistas no implementándose un régimen de alternancia de plantaciones ni planes de mitigación ante la intensidad de uso de suelos. A pesar de los años transcurridos aun la microcuencas no se ha recuperado por si misma de los daños ocasionados por la actividad humana.



**Figura 3.20. Mapa de pendientes de la microcuencas 4.** Predominan en esta microcuencas los lomajes suaves con poca presencia de pendientes que superen 10 grados. Fuente. Elaboración propia.

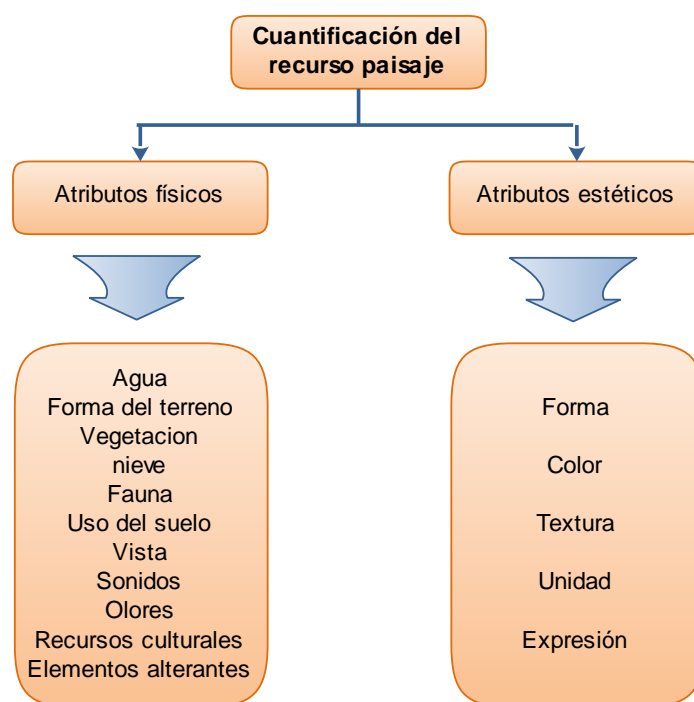


**Figura 3.21. Microcuenca 4.** Los rangos de coberturas existentes, corresponden a pequeñas agrupaciones vegetales que se ubican principalmente en fondos de valle, donde la humedad del suelo se mantiene por más tiempo. La ladera norte está casi desprovista de vegetación y la erosión es severa a muy severa. Fuente: Captación propia

### 3.11. CUANTIFICACIÓN DEL RECURSO PAISAJE

Aunque aún existe una indeterminación conceptual y metodológica relativa al concepto paisaje, existen claramente dos aspectos fundamentales: uno que dice relación con el paisaje total (aspecto relacionado con el medio) y el paisaje visual que se relaciona más con la estética y la percepción (Aguiló, et al, 1993). “En otras palabras, el paisaje resulta de la combinación de la geomorfología, clima, vegetación, fauna, agua y la incidencia de las alteraciones de tipo natural y las alteraciones antrópicas” (Aguiló, et al, 1993).

Para cuantificar y globalizar los aspectos mencionados, se utilizó la metodología propuesta por Téllez (2001). Esta proporciona un análisis integral, (puede en algunos casos caer en la subjetividad del observador) otorgando una herramienta para determinar si un paisaje es bueno, regular o mediocre (Anexo 3).



**Figura 3.22. Elementos de cuantificación del recurso paisaje.** Los atributos físicos y los estéticos se cuantifican mediante la caracterización de subparámetros, los cuales a su vez adquieren un valor propio dado por su grado de incidencia en la microcuenca respectiva. Fuente: Téllez, 2001.

La tabla 3.4 proporciona información sobre el estado y cuantificación de los parámetros descritos en la figura anterior. En ellas se evalúan los parámetros físicos y estéticos dando la cuantificación final para describir finalmente el estado del paisaje. Sin embargo, cabe recalcar que además se consideraron los valores de paisaje correspondientes a la cuantificación de los valores que existían en las microcuencas antes del incendio y después del incendio de febrero de 2012 para las microcuencas 2 y 3.

ATRIBUTOS		MICROCUENCAS					
	<b>Físicos</b>	<b>MC1</b>	<b>MC2<sup>37</sup></b>	<b>MC2<sup>38</sup></b>	<b>MC3<sup>39</sup></b>	<b>MC3<sup>40</sup></b>	<b>MC4</b>
<b>1</b>	Agua	0	10	2,5	10	10	0
<b>2</b>	Forma del terreno	2	2	2,0	8	8	4
<b>3</b>	Vegetación	15	24,74	4,0	11	8	0
<b>4</b>	Nieve	0	0	0,0	0	0	0
<b>5</b>	Fauna	5	5	3,0	5	3	3
<b>6</b>	Usos del suelo	1	10	10,0	10	10	10
<b>7</b>	Vistas	1,5	3	8,0	1,5	4,5	1
<b>8</b>	Sonidos	2	2	2,0	2	2	4
<b>9</b>	Olores	4	3	2,0	4	2	6
<b>10</b>	Recursos culturales	0	0	0,0	0	0	0
<b>11</b>	Elementos alterantes	0	0	0,0	0	0	0
	Total atributos físicos	30,5	59,74	33,5	51,5	47,5	28
	<b>Estéticos</b>						
<b>1</b>	Forma	6,25	10,75	-1	10,75	-1,5	1,75
<b>2</b>	Color	7,75	12,25	-1	7,75	-1	1,75
<b>3</b>	Textura	9,25	9,25	-1	9,25	-1	-1
<b>4</b>	Unidad	12	12	0,0	12	0,0	0
<b>5</b>	Expresión	15	15	8	15	8	8
	Total atributos estéticos	50,25	59,25	5	54,75	4,5	10,5
	<b>Total recursos<sup>41</sup></b>	<b>80,75</b>	<b>118,99</b>	<b>38,5</b>	<b>106,25</b>	<b>52</b>	<b>38,5</b>

**Tabla 3.3. Atributos físicos y estéticos de las microcuencas (MC).** La tabla indica los valores de los atributos físicos y estéticos de las 4 microcuencas. Además la tabla muestra los valores de las microcuencas 2 y 3 antes del incendio y después del incendio, los cuales, indican una disminución de un 67,64 % en la microcuenca 2 y de un 51,05 % para la microcuenca 3. Fuente: Elaboración propia.

<sup>37</sup> Antes del incendio

<sup>38</sup> Después del incendio

<sup>39</sup> Antes del incendio

<sup>40</sup> Después del incendio

<sup>41</sup> Valor a localizar y describir en la tabla 3.15

Intervalos de Puntuación	Categoría
< 20	Degradado
20 – 32	Deficiente
33 – 44	Mediocre
45 – 56	Bueno
57 – 68	Notable
69 – 80	Muy Bueno
> 80	Excelente

**Tabla 3.4. Tabla de clasificación de paisajes según intervalos de puntuación.** La clasificación del tipo de paisaje según la cuantificación de los atributos físicos y estéticos se efectúa en base a intervalos de puntuación en los cuales se estipula una determinada categoría en función de la puntuación final. Fuente: Téllez, 2001.

La cuantificación del paisaje según esta clasificación coincide con los elementos descritos por Rubio (1996), según el cual, los paisajes están formados por naturaleza, cultura e intangibles. Según esto, el paisaje es un constructo sistémico con diferentes apreciaciones según la estructura cognitiva de cada observador. Tomando esto último como eje rector, no existe por lo tanto, una catalogación única que sirva como elemento unificador para la cuantificación del paisaje. Continuando con esta lógica, la caracterización o tipificación del paisaje puede tomar tantas acepciones como investigadores trabajen en él.

Todos estos elementos que limitan el estudio del recurso paisaje han tratado de ser sorteados con la metodología propuesta por Téllez (2001), la cual, fue aplicada a las 4 microcuencas y cuyos resultados se cuantifican en la tabla 3.3. La microcuenca 1 presenta un paisaje catalogado como muy bueno, esto se debe a que la restauración a la cual se sometió la microcuenca disminuyó notablemente su deforestación así como parte de la superficie erosionada. En la microcuenca 2 hay una salvedad: antes del incendio de 2012 el paisaje en esta cuenca se clasificaba como excelente, pero, la magnitud del incendio hizo disminuir notablemente sus atributos dejándolo con un valor de 38,5; lo cual se considera mediocre. Igual cosa ocurrió con la microcuencas 3, la cual, también había sido sometida a restauración como parte del proyecto CONAF–JICA con la implementación de los dispositivos hidrológico – forestales, pero, la acción del incendio hizo disminuir su puntuación de 106,25 a 52; esto es, pasó de tener un paisaje excelente a uno bueno. Los antecedentes (descriptivos y fotográficos) que se tienen de las microcuencas antes de la instalación de las obras de restauración al inicio del proyecto (en los años 90), permiten asegurar su incidencia en el cambio de paisaje ocurrido en Alto Loica.

Caso aparte lo constituye la microcuencas 4 que no fue sometida a ningún tratamiento de restauración y por lo tanto la erosión hídrica y eólica han aumentado e intensificando el daño en los suelos de esta microcuenca. El accionar de la erosión, la desertificación y la ausencia de una capa vegetal y arbórea consistente han conspirado para que esta microcuenca aun no se recupere y sea incapaz por si sola de impedir los procesos erosivos. Por esto, la catalogación para esta microcuenca es de 38,5; lo cual según la metodología de Téllez es un paisaje mediocre.

### 3.12. DISCUSION

La FAO en cooperación con CONAF decidió poner en marcha un ambicioso plan para revertir el proceso de erosión en la zona central de Chile. Esta zona de características mediterráneas conforma un hotspot ecológico (Arroyo, et al, 2002) altamente valorizado por sus servicios ecosistémicos y por su capacidad de servir como ecosistema buffer para impedir el avance de la desertificación desde la zona norte del país, motivo por el cual, esta zona fue elegida para desarrollar un plan piloto contra la erosión y desertificación. En la década de los 80, la FAO (en cooperación CONAF) localizó los lugares con más problemas de desertificación en la zona central de Chile ubicando a la zona de San Pedro de Melipilla como una de las 3 zonas más erosionadas y con riesgo de desertificación en la zona metropolitana. El lugar elegido para la instalación de las obras tenía como fuerte condicionante la gran pobreza rural de su población, la cual, depredó gran parte del bosque esclerófilo para combustible. El plan inicial llevado a cabo por la FAO no fructificó debido a que excluyó a la población de sus planes originales, es decir, no consideró a la población local como parte constituyente del proyecto, lo cual, podía haber sido exitoso si los habitantes hubieran concientizado el manejo racional de los pocos recursos existentes y la forma de recuperar las microcuencas y su entorno más inmediato. Esto último refleja según Castellano (2003) que al desarrollar proyectos y/o programas de rehabilitación y consolidación de espacios públicos sin considerar las necesidades y preferencias de los individuos, termina en la destrucción, deterioro, falta de uso e identidad y abandono de los espacios comunes, muchas veces por falta de identidad con los elementos que le son suministrados. El proyecto CONAF – JICA consideró este importante elemento en la concreción del proyecto y la población tuvo una participación vital, la cual, era atingente a sus necesidades más inmediatas, lo que de alguna manera ha hecho posible que a pesar de los años que se dio inicio al proyecto con Japón este aún siga siendo administrado por personal especializado de CONAF y se sigan ejecutando importantes trabajos de investigación a nivel nacional e internacional, materializándose en publicaciones efectuadas por CONAF y en la elaboración de tesis de pre y posgrado de universidades nacionales y extranjeras.

El lugar elegido contempla una zona campestre con altos grados de pobreza ubicado en la subcuenca El Yali y aunque se caracterice por ser un lugar en que predomina la *Acacia cavens*, forma parte de una zona con un alto grado de naturalidad (además de ser la única comuna 100 % rural de la región metropolitana) por ser uno de los últimos sitios hacia el sur donde se localiza esta especie, ya que, su rango de distribución natural era hasta el sur de la cuenca del Cachapoal. Los suelos son pobres desde el punto de vista productivo lo que de alguna manera favorece el proceso de erosión debido a la pérdida de la capa vegetal, esto se ve favorecido por el hecho de estar situada en la cordillera de la costa y lejos de la depresión intermedia que es donde se encuentran los suelos más aptos para las labores de cultivo (suelos tipo I al III).

Las lluvias no superan los 400 mm, lo cual no es favorable para el desarrollo de especies en abundancias ni para el desarrollo de actividades agropecuarias de gran envergadura. Sin embargo no siempre fue así, las indicaciones que existen respecto al fenómeno del Enso indican que las precipitaciones fueron intensas en los primeros años del siglo XX (DGAC, 2010)

Año	Precipitación (mm)	Año	Precipitación (mm)
1902	505.9	1953	583.0
1905	615.9	1957	310.4
1911	170.0	1965	413.4
1914	700.5	1972	573.0
1918	376.8	1976	200.5
1925	258.6	1982	623.4
1929	354.2	1986	311.3
1939	322.6	1992	464.0
1941	671.9	1997	709.3

**Tabla 3.5. Precipitaciones en años con fenómeno del niño.** Se indica la precipitación total anual registrada en la Región Metropolitana, en años definidos como de comienzos de un evento del Niño. La precipitación anual normal de Santiago, es de 312.5 milímetros, por lo tanto se puede apreciar que durante el pasado siglo, de los 18 eventos del Niño ocurridos, en 5 de ellos (1911, 1925, 1957, 1976 y 1986), la precipitación fue deficitaria; 3 de ellos la precipitación fue en promedio 33% inferior a lo normal y en los otros 2 años fue ligeramente inferior (1957 y 1986). En los otros 13 años, la precipitación fue mayor a lo normal, hasta en un 127% (1997). El promedio de los totales anuales de precipitación de los años con episodio El Niño es de 453.6 mm, 45% superior a la normal anual. Fuente: DGAC, 2010.

La alta tasa de deforestación es un elemento que ha incidido (como en otras partes del mundo) en la disminución de las precipitaciones a lo largo del siglo pasado sumándose a ello los efectos ocasionados por el cambio climático en Chile (Conama, 2006); fenómeno que ocurre en muchas partes del mundo (IPCC; 2005).

El uso indiscriminado de los recursos naturales de las microcuencas y de la subcuenca en general por parte de una población que no tenía conocimiento ni concientización respecto a fenómenos como la resiliencia y el manejo (en vez de uso) de los recursos propios de la zona fue también un factor determinante para que el lugar fuera escogido para el proyecto CONAF – JICA de tal forma de no cometer el mismo error del proyecto FAO que excluyó a la población local lo que finalmente provocó que éste fuera inviable en el tiempo. Otro elemento clave para la elección del sitio fue su cercanía a Santiago lo cual hace que el control sobre las áreas de manejo fuera más controlable que zonas que hubieran estado mucho más apartadas.

Respecto a esto último, la conjunción de muchos factores como la falta de concientización de la población, su cercanía relativa a Santiago, el hecho de ser una de las 3 áreas más deforestadas de la zona central y recobrar o volver a darle vida a un proyecto que había dejado fuera a la población como elemento esencial de su desarrollo fueron claves para la elección de las microcuencas de Alto Loica como sitio específico para la instalación de los dispositivos de restauración mecánica y las tareas de reforestación.

Por estar ubicadas en la zona de la Cordillera de la costa no es un área homogénea desde el punto de vista de la topografía y la geomorfología. La subcuenca el Yali y las microcuencas en estudio están conformadas por zonas muy escarpadas y de quebradas lo que favoreció la acción de la erosión principalmente producida por las escorrentías por lo que las cárcavas son muy comunes en este lugar. Esto hizo que las obras de restauración respondieran no solo a una variable limitada solo al uso, sino también, a la

topografía lo cual favoreció la conexión entre las obras de ingeniería y la recuperación y forestación efectuadas en las microcuencas como parte del proyecto.

La reforestación del área se efectuó básicamente con eucaliptus debido a su rápido crecimiento y sus bajos costos económicos, pero el área ya estaba fuertemente impactada por la deforestación por lo que aún no se han podido restablecer las condiciones microbioclimáticas que imperaban en la zona antes que la vegetación fuera arrasada por la población local.

Respondiendo a las exigencias que implicaba el proyecto el área se ajustaba al desarrollo de estas especies no usándose en su mayoría flora nativa debido a la lentitud de su crecimiento, con lo cual, las condiciones de homeostasis serán más difíciles de alcanzar traduciéndose en que los ajustes naturales que necesitan las microcuencas para poder controlar los procesos erosivos serán más lentos o en menor grado.

Además, no solo la reforestación en esta área es el único elemento a considerar ni tampoco por si solo el más importante. Debido a las características físicas, topográficas y ecológicas de la zona (descritas en este capítulo), el D.L. 701 dejó de cumplir con su labor esencial. Principalmente este decreto apuntaba a la reforestación para restablecer suelos erosionados, para que a futuro reportara beneficios económicos para la población, pero los beneficios económicos que pueden obtenerse de las microcuencas son mínimos y casi inexistentes si se considera la sequedad del lugar y las fuertes inversiones que allí se necesitan (salvo que se desarrollen proyectos de inversión con fines lucrativos de elevado costo económico). Por este motivo, las microcuencas de trabajo solo se tomaron como centros experimentales (con la posibilidad adicional que resultara en beneficios tangibles para la población) por todas las características antes descritas, aunque, el proyecto considera que de ser extrapolado a otras áreas si resulte en beneficios económicos, lo cual tiene una fuerte componente antropocentrista eludiendo completamente los beneficios ecosistémicos frutos de la restauración ecológica.

Otro factor que merma la posibilidad que en esta área específica se logren beneficios económicos concretos es la disminución en el nivel de las napas freáticas del lugar lo que ha contribuido a que la sequedad de los suelos aumente y se recurra a la formación de embalses para el abastecimiento de agua. Esto último se ha traducido en la disminución de la actividad agrícola en el sector en los últimos años y ha sido una de las causas de la pobreza existente en la comuna de San Pedro de Melipilla.

Por todas estas razones y por las condiciones propias del lugar, fue escogida la zona de San Pedro de Melipilla, ya que, la opción que las microcuencas recuperen (gracias a los dispositivos de restauración ambiental) parte de sus condiciones microbioclimáticas, flora y fauna es esencial para la extrapolación del proyecto hacia otras áreas con altos niveles de erosión o a zonas claves en las cuales el avance del desierto es crítico, ya que, esto último es actualmente uno de los grandes problemas ecológicos a nivel nacional.

Si bien, el lugar elegido estaba altamente erosionado y deforestado, era necesario establecer cuantitativamente el grado de daño en las matrices ambientales así como en la vegetación para establecer parámetros claros que permitieran una diferenciación cuantitativa entre microcuencas.



### 3.13. BIBLIOGRAFIA ESPECÍFICA

AGUILO, Miguel; Aramburu, María; Blanco, Alfredo; Calatayud, Teresa; Carrasco, Rosa; Castilla, Guillermo; Castillo, Víctor; Ceñal, María. *Guía para la elaboración de estudios del medio físico*, editado por: Secretaria de estado para las políticas del agua y el medio ambiente, Ministerio de obras públicas y transporte. Madrid, España. 1993. 808 págs.

AGUIRRE, Margarita. *Atlas universal Antártica Chile y sus regiones*. 16ª edición, Santiago de Chile. Editorial Antártica. 2009, 115 págs.

ARMESTO J, D Manushevich, C Mora, R Smith-Ramirez, A Rozzi, A Abarzua, P Marquet. From the Holocene to the Anthropocene: a historical framework for land cover change in southwestern South America in the past 15.000. years. *Land Use Policy* 27: 148-160. 2010.

ARROYO, Mary; Marticorena, Clodomiro; Matthei, Oscar; Muñoz, Melica y Pliscoff Patricio. "Análisis de la contribución y eficiencia del Santuario de la naturaleza Yerba Loca, 33° S, en la protección de la flora vascular regional (regiones metropolitana y Quinta de Chile). En: Revista Chilena de Historia Natural. 75 (4): 767 – 792. 2002.

CASTELLANO, Cesar; Pérez, Tomás. "El espacio barrio y su espacio comunitario, un método para la estructuración de lo urbano", en *Boletín del Instituto de la Vivienda*, 18 (48), Santiago de Chile, editada por Instituto de la vivienda de la Universidad de Chile, 2003, pp. 78 – 92.

CIREN. Centro de información de recursos naturales. Estudio Agrologico RM. Descripción de suelos, materiales y símbolos. Tomo 1. Santiago. 1996.

CONAMA. *Estudio de la variabilidad climática para Chile en el siglo XXI*. Departamento de Geofísica, Facultad de Ciencias físicas y matemáticas, Universidad de Chile. Santiago de Chile, 2006, 71 Págs.

FRANCKE, Samuel. Control de erosión y forestación en cuencas hidrográficas de la zona semiárida de Chile, en: *Chile Forestal*. N° 321: 17 – 18. 2006.

GAJARDO, Rodolfo; *La Vegetación Natural de Chile: Clasificación y Distribución Geográfica*. Santiago de Chile. Editorial Universitaria, 1994. 165 págs.

INE Instituto Nacional de Estadísticas, 2012. Medio Ambiente Informe Anual. Editado por el Instituto nacional de estadísticas. Santiago de Chile. N° 19, 384 Págs.

INE(a) Instituto Nacional de Estadísticas, 2005. Regiones 1990 – 2005. Panorama económico y social de la Región Metropolitana. Editado por el Instituto nacional de estadísticas. Santiago de Chile, 29 Págs.

INE(b) Instituto Nacional de Estadísticas, 2005. Medio Ambiente Informe Anual. Editado por el Instituto nacional de estadísticas. Santiago de Chile. N° 19, 322 Págs.

INTERGOVERNMENTAL Panel on Climate Change (IPCC). *Climate Change 2005*. The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment. Cambridge University Press, Cambridge. 2005.

INZUNZA, Juan. *Meteorología descriptiva y aplicaciones en Chile*. Departamento de física y de la atmosfera, Universidad de Concepción. Concepción, Chile, 2000. 451 págs.

IPLA, Consultores. Estudio del mapa hidrogeológico nacional. Ministerio de obras públicas, Dirección general de aguas. Santiago de Chile, 1986, 413 págs.

IPLA, Consultores. Análisis, uso actual y futuro de los recursos hídricos de Chile. Ministerio de obras públicas, Dirección general de aguas. Santiago de Chile, 1996, 167 págs.

SANCHEZ, Alfredo y Morales, Roberto. *Las regiones de Chile*. 4ª edición, Santiago de Chile. Editorial universitaria. 2004, 262 págs.

RUBIO, Patricio. La teoría general de sistemas y el paisaje, en: revista *Treballs de la societat catalana de geografia*. N° 41: 91 – 104, 1996.

TÉLLEZ, Alex. *Gestión sostenible de paisajes naturales*. 1ª edición. Madrid, España. 2001, 304 págs.

TRIVELLI, Cristian. Evaluación de la aplicación de técnicas de restauración hidrológica forestal y ambiental en procesos de erosión de cárcavas. Tesis (Ingeniero forestal). Santiago, Chile. Universidad Mayor, Facultad de ciencias forestales, 2006. 156 págs.

## **WEB**

Dirección general de aeronáutica civil (DGAC). Dirección meteorológica de Chile. [Fecha de consulta: 21 de junio de 2010]. <[http://www.meteochile.cl/nino\\_nina/nino\\_nina\\_descripcion\\_nina.html](http://www.meteochile.cl/nino_nina/nino_nina_descripcion_nina.html)>

Ilustre Municipalidad de San Pedro de Melipilla [Fecha de consulta 15 de noviembre de 2010]. <<http://www.Sanpedrodemelipilla.cl>>

---

## CAPITULO IV

# GESTIÓN DE CUENCAS Y TIPIFICACIÓN DE SUELOS

---



Los suelos de la subcuenca el Yali están formados por suelos de uso forestal y agrícola, los cuales, han sido intensamente utilizados en labores de pastoreo y tala rasa, especialmente de ejemplares arbustivos nativos. Esta deforestación se ha traducido en erosión generando alteraciones profundas en las condiciones del suelo que se traducen en cambios en las condiciones y propiedades del mismo. El cambio en los compuestos órgano–metálicos producto de la actividad biológica supone una reducción de la superficie erosionada al producirse la descomposición aeróbica de la materia orgánica generada a su vez por la aparición de flora arbustiva. A su vez, cambios como el aumento de la interceptación, infiltración, etc....contribuyen a la maximización de actividad biológica, la cual, mediante una estimulación en feed – back cambia la estructura y funcionalidad de la microcuenca como sistema.

La eliminación de oxígeno y el cambio en la solubilidad y acidez de las sustancias del suelo son indicadores claves a la hora de cuantificar los cambios en las microcuencas en comparación a la cuenca control y que de alguna manera pueden ser decisivos para la toma de decisiones en materia de restauración y reforestación, debido a que indican fehacientemente que las obras hidrológico–forestales permiten revertir procesos erosivos o retornar a ciertos grados las actividades iniciales que tenía el suelo antes del uso intensivo dado por la población rural. La cuantificación de estos procesos (en los planos físicos y químicos) se traduce en información significativa (estadísticamente hablando) que establecen antecedentes, los cuales sientan precedentes para estudios posteriores aplicables a otras cuencas que necesiten restauración y planes de manejo para revertir procesos erosivos ya sea naturales o antrópicos.

Esta información al analizarse debe permitir observar la situación integral, ya que, un estudio reduccionista (ya sea en materia de degradación física de los suelos, el sobrepastoreo, la degradación de la cubierta vegetal, la pérdida de producción agrícola, etc.) no presenta un panorama útil por sí solo; y sólo un estudio integrado de todos los recursos permite que se conozca la situación real. En el caso del estado de la subcuenca El Yali, donde la dinámica de degradación no responde a límites geopolíticos y los procesos interaccionan de forma geográfica natural, la cuenca es una respuesta a este análisis. Las acciones encaminadas a la planeación deben considerar, primeramente, el detener los procesos que empobrecen la capacidad productiva de los recursos naturales, por lo que el primer paso es ubicar los principales procesos que los afectan, y posteriormente, diagnosticar el estado de desequilibrio ecológico y realizar acciones viables (Torres, 2003)

El recurso suelo no goza del mismo reconocimiento que los demás recursos naturales como, por ejemplo, las aguas, los bosques o los yacimientos minerales, porque no es un bien directamente consumible y por la creencia común, pero errónea, de que los suelos son renovables a escala humana. En efecto, los seres humanos logran destruir en unos

pocos años un capital, que a la naturaleza le cuesta miles de años formarlo (Zinck, 2005). La degradación antrópica del suelo es un conjunto de procesos dinámicos (físicos, químicos y biológicos) que afectan la productividad de los ecosistemas, lo cual puede llegar a ser irreversible. Esta degradación se relaciona con el uso inadecuado de los recursos agua, suelo, flora y fauna; los dos primeros son la base fundamental para el abastecimiento de alimentos para las plantas, los animales y el hombre; y entre todos, interactúan influenciándose entre ellos siendo necesarios para la mantención y desarrollo del sistema (Parra, 2009).

El concepto de degradación de suelos y el de degradación de tierras no son sinónimos, pero el primero es indudablemente el componente más importante del segundo (sobre todo a nivel de gestión de cuencas). A escala global, la erosión hídrica es el proceso dominante en la degradación de suelos inducida por intervenciones humanas, el cual afecta a cerca de 11 millones de km<sup>2</sup> (Oldeman, 1994). En Chile y más específicamente en la zona centro y norte del país los suelos son particularmente vulnerables al uso. Existen algunas aproximaciones cuantitativas de la degradación de suelos en la subcuenca el Yali pero resulta frecuentemente difícil comparar datos provenientes de fuentes diferentes porque no se utilizaron los mismos criterios en la evaluación de la degradación. Todavía no se dispone de información adecuada sobre las tasas de degradación de tierras porque esto requiere seguimiento temporal. Se estima que cada segundo se pierden 8,5 hectáreas de tierras productivas en el mundo (Movillon, et al., 2001).

En la actualidad, ha cobrado importancia el hecho que al suelo se le considere de manera más apropiada en los diversos programas de conservación de los recursos naturales, ya que se trata de un recurso no renovable<sup>42</sup>, por lo que su degradación acarrea graves consecuencias económicas, sociales y ambientales (Artieda, 2004). Con anterioridad, el desconocimiento, la falta de interés y de recursos económicos han propiciado que, en algunas ocasiones, se hayan ejecutado diversas acciones sin considerar los procesos de formación y las características físicas y químicas de los suelos (Vela – Correa, 2004).

Por esto, es importante definir los indicadores de capacidad y de vulnerabilidad, los cuales, constituyen la piedra angular de un método de evaluación de suelos diseñado en función de las peculiaridades biofísicas de éste (Año et al., 2002). La evaluación de una serie de características intrínsecas y extrínsecas del medio edáfico, permite diagnosticar la capacidad del suelo y su vulnerabilidad a la degradación, para posteriormente implementar técnicas de recuperación.

La forma de abordar un estudio de esta magnitud es a través de la cuenca, ya que ésta constituye la unidad física completa, donde una de las entradas es la precipitación y las salidas son el escurrimiento y el sedimento; el proceso incluye la influencia de la vegetación, suelo y topografía (Torres, 2003). El estudio de una cuenca como unidad de gestión para organizar actividades que mejoren la calidad de vida del hombre tiene su origen en el estrecho vínculo que existe entre los procesos que en ella suceden y las necesidades humanas (Torres, 2003).

---

<sup>42</sup> Se considera no renovable, ya que, no se renueva a escala humana o en algunos casos, el daño es tan alto que el proceso es irreversible. Ejemplo de esto último es lo ocurrido con las civilizaciones del Medio Oriente y de Argólida hace 2000 años. En ambos casos, los efectos son visibles hasta el día de hoy.

## **4.1. CUENCAS HIDROGRAFICAS**

En una cuenca, los flujos hídricos, energéticos, de nutrientes y materiales determinan el funcionamiento y la productividad de los ecosistemas terrestres y acuáticos. En ese sentido, la cuenca se caracteriza por una dinámica ambiental definida por las interacciones sistémicas entre los recursos agua, suelo, geoformas, vegetación y el impacto que sobre estas interacciones tienen las decisiones en materia de usos de los recursos naturales tomadas por los distintos actores (Martínez, et al, 1996). La cuenca constituye entonces una unidad ecogeográfica relevante para analizar los procesos ambientales generados como consecuencia de las decisiones en materia de uso y manejo de los recursos agua, suelo y vegetación, y es por lo tanto, también el marco apropiado para la planificación de las medidas destinadas a corregir los impactos ambientales producto del uso y manejo de los recursos (Cotler, et al, 2004). Los flujos de agua, materiales y energía no se restringen a límites administrativos sino más bien a límites naturales, por ello, la priorización de ciertas zonas (como reservas de biodiversidad) debe determinarse según su posición en la cuenca. Al interior de cada cuenca sus zonas funcionales (cabecera, captación-transporte y emisión) juegan un papel particular en el funcionamiento hidroecológico de toda la cuenca en su conjunto y por ende presentan un grado de fragilidad diferente. La zona de cabecera constituye el área donde se inician los cursos de agua. Esta función se logra cuando los suelos, generalmente bajo cubierta forestal, se saturan de agua fomentando el escurrimiento ante la infiltración. La función de esta zona es vital para el funcionamiento de toda la cuenca y que dada las condiciones que requiere su funcionamiento, su fragilidad es elevada. La zona de captación-transporte (normalmente la más extensa) se caracteriza por ser donde concurren los cursos de agua, sus materiales, sedimentos y nutrientes. Finalmente, la zona de emisión es la que recibe los cursos de agua que se encuentran en su estado más caudaloso y dado el relieve, con menor energía. Dada la fragilidad de cada zona funcional, los procesos de degradación de suelos originarán impactos de diferentes magnitudes. Asimismo, las consecuencias dentro y fuera del sitio son distintas. Uno de los principales problemas es la erosión hídrica, que se basa en la destrucción de la estructura del suelo y del arrastre de partículas finas y materia orgánica. A nivel global este proceso provoca modificaciones de la envergadura del cambio climático, la pérdida de biodiversidad y la modificación del régimen hidrológico de cuencas internacionales (Cotler, et al, 2004).

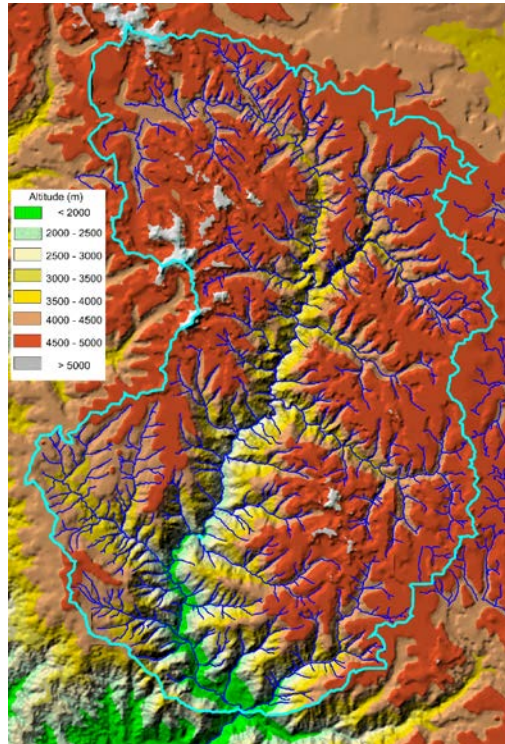
En la mayoría de los países subdesarrollados y en vías de desarrollo, el ordenamiento territorial no ha sido cluster para las autoridades gubernamentales. En cambio, el ordenamiento básico, establecido en función de las unidades aisladas ha sido la tónica principalmente a nivel urbano. La ordenación por cuencas es una tarea pendiente e implica un conocimiento profundo de las tramas naturales y un cambio de paradigma de una fase reduccionista a uno sistémico en el cual, las propiedades emergentes sean la base para el uso y ordenación de los elementos que componen una cuenca hidrográfica (Cotler, et al, 2004)

### **4.1.1. Nociones Básicas**

Para definir el concepto de cuenca hidrográfica, desde un enfoque global, la premisa fundamental debe partir de entender a la cuenca hidrográfica como un sistema social, económico, físico y biológico. La cuenca como unidad geográfica constituye un ámbito biofísico ideal para caracterizar, diagnosticar, evaluar y planificar el uso de los recursos en tanto que la parcela o finca agrícola puede ser el medio adecuado para el manejo de los

recursos, según la vocación de la cuenca y de acuerdo a los sistemas productivos en la dinámica de su entorno ecológico y socioeconómico productivo (Parra, 2009).

La definición anterior se enmarca en el denominado “enfoque global”, lo cual hace referencia a la metodología para el manejo integral de los recursos naturales, en particular, para el ordenamiento y manejo de los recursos hídricos. Derivado de los acuerdos tomados a nivel mundial (de ahí el término global) en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (Río de Janeiro, Brasil, 1992), y la Conferencia Internacional sobre el Agua y el Medio Ambiente (León, et al, 1998)



**Figura 4.1. Cuenca hidrográfica.** Una cuenca está delimitada por las altas cumbres lo que morfológicamente da lugar a una unidad morforterritorial con características definidas y con múltiples funciones ecológicas, lo que hace que naturalmente la cuenca se encuentre en equilibrio, salvo, que este equilibrio se altere por causas naturales (retomando un equilibrio en cierto periodo de tiempo) o antrópicas. Fuente: Francke, et al, 2008.

“El espacio físico de la cuenca hidrográfica se limita por las partes más altas de las montaña, laderas y colinas, en donde se desarrolla un sistema de drenaje superficial que concentra sus aguas en un río principal el cual se integra al mar, lago u otro río más grande. En ella se ubican, los recursos naturales y el hombre, incluyendo todas las actividades que realiza. Una cuenca a partir del grado de concentración de la red de drenaje define unidades menores como subcuencas y microcuencas. La primera hace referencia a toda área que desarrolla su drenaje directamente al curso principal de la cuenca. Varias subcuencas pueden conformar una cuenca; la microcuenca en cambio, desarrolla su drenaje directamente a la corriente principal de la subcuenca. Varias microcuencas a su vez, conforman una subcuenca. Desde luego esta clasificación no es única, existen otros tipos de criterios relacionados al tamaño de la cuenca y estos a su vez con el tamaño de orden de drenaje y/o con el tamaño de área que encierran (Francke,



et al, 2008). Otro aspecto es la división de la cuenca en alta, media y baja, división que se realiza, generalmente, en función de su relieve topográfico, alturas y aspectos climáticos; lo cual, permite relacionar cómo las partes altas de la cuenca inciden en las partes bajas. Por ejemplo, si se deforesta la parte alta de la cuenca afecta la escorrentía en las partes bajas, o si se aplican agroquímicos y plaguicidas en las partes altas, se contaminan las aguas en la parte baja. Otra forma de caracterizar las cuencas puede ser de acuerdo a factores socioeconómicos<sup>43</sup>, por ejemplo, por su densidad demográfica o poblacional, por su actividad económica predominante o por determinadas características de suelo y clima”. (León, et al, 1998)

Francke y colaboradores (2008), menciona diferentes definiciones para el concepto cuenca según distintos elementos estructurales y funcionales:

*“Desde el punto de vista meramente fisiográfico, una cuenca hidrográfica es una superficie limitada geográficamente por la divisoria de aguas y donde las aguas de escorrentía drenan hacia un río principal”.*

*“Desde el punto de vista holístico territorial - ambiental: Cuenca hidrográfica es el espacio territorial y atmosférico delimitado geográficamente por la divisoria de las aguas, en cuyo ámbito ocurre el ciclo hidrológico y donde interactúan todos los recursos naturales que lo componen (hídricos, pedológicos, climáticos, vegetacionales y faunísticos) conformando un complejo ecosistémico y ambiental característico”.*

*“Desde el punto de vista de desarrollo integral sustentable: Igual a la definición anterior, agregando la intervención e interrelación de factores sociales, económicos, políticos e institucionales procurando maximizar el bienestar de la población integrante”.*

*“Definición de FAO (1992): Cuenca hidrográfica es una zona delimitada topográficamente que desagua mediante un sistema fluvial, es decir la superficie total de tierras que desaguan en un cierto punto de un curso de agua o río. Constituye una unidad hidrológica descrita como una unidad físico-biológica y también como unidad socio-política para la planificación y ordenación de los recursos naturales”.*

El mismo autor (Francke, et al, 2008) ofrece 5 definiciones concretas para el concepto de manejo integrado de cuencas hidrográficas

*“Uso racional y práctico del espacio de una cuenca para potenciar adecuadamente todos los recursos naturales existentes dentro de ella, aplicando tecnologías que se refieren al aprovechamiento y conservación de los recursos naturales, la infraestructura básica rural y la protección de las ciudades”.*

*“Conjunto de acciones integradas, orientadas y coordinadas sobre los elementos variables del medio ambiente en una cuenca, tendientes a regular el funcionamiento de este ecosistema, con el propósito de elevar la calidad de vida de la población inserta en ella”.*

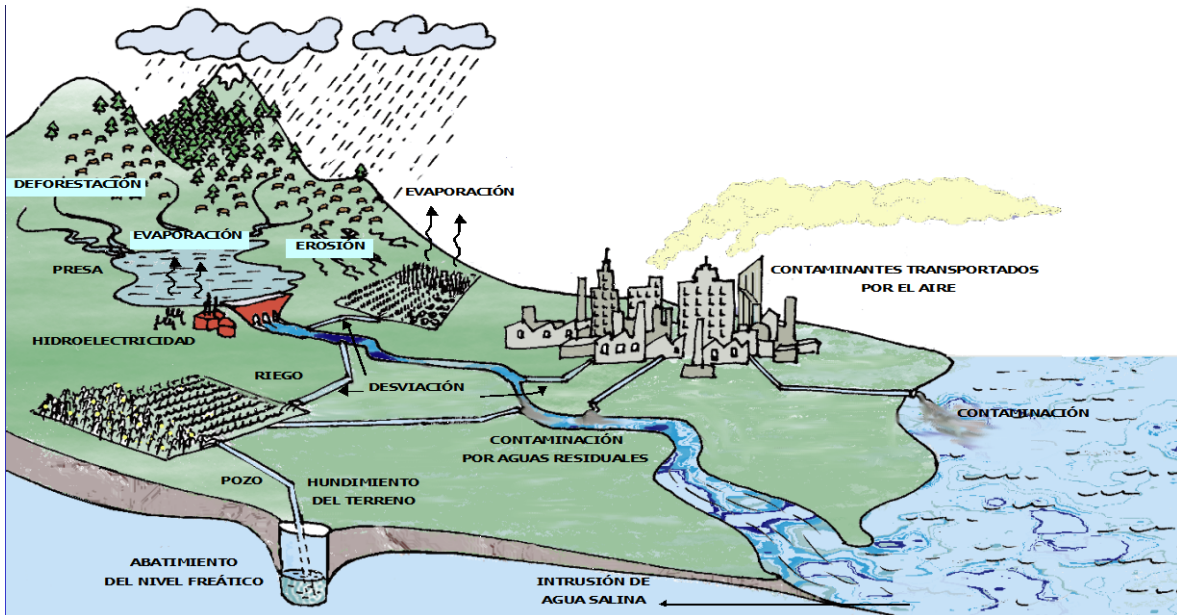
---

<sup>43</sup> En Chile, la población rural se instaló históricamente en las zonas altas y medias de las cuencas (debido al desarrollo de la agricultura y la ganadería de los arrieros cordilleranos. Esto viene condicionado de tiempos coloniales, ya que, la Corona española había prohibido la fundación de ciudades costeras debido al ataque de piratas y corsarios ingleses), mientras que la población de nivel socioeconómico alto comenzó a habitar las zonas bajas (debido al desarrollo de la actividad comercial ligada al movimiento marítimo, fenómeno social muy marcado en ciudades como Iquique y Valparaíso). Una excepción la constituyen las zonas cordilleranas con presencia de centros invernales donde los niveles socioeconómicos altos son predominantes.

“Es una actividad que considera gran parte de los elementos presentes en un sistema hidrográfico, posibilitando a través del trabajo interdisciplinario, la consolidación de iniciativas que permiten aprovechar y proteger los recursos naturales existentes con el fin de obtener una producción óptima y sostenida”.

“Conjunto de esfuerzos tendientes a identificar y aplicar opciones técnicas, socioeconómicas y legales, que establecen una solución a la problemática causada por el deterioro y mal uso de los recursos naturales renovables, así como de las cuencas hidrográficas, para lograr un mejor desarrollo de la sociedad humana”.

“Es la comprensión sistémica de las interacciones entre el medio biofísico, los modos de apropiación del territorio (considerando economía, tecnología, organización social) y las instituciones existentes, buscando la integración de los actores involucrados en una sola problemática, en lugar de atender varios problemas sectoriales dispersos”.



**Figura 4.2. Eventos antropocópicos en una cuenca hidrográfica.** Una cuenca puede tener de cientos a miles de  $\text{km}^2$ . Los impactos ambientales producidos en la cuenca no son aislados, por tratarse de una unidad ordenada naturalmente, se generan teleconexiones en las zonas medias y altas dependiendo de la zona en la cual se generan los impactos. Actualmente, el ordenamiento de cuencas se presenta como una herramienta para gestionar la acción del hombre en la naturaleza. Fuente: Francke, et al, 2008.

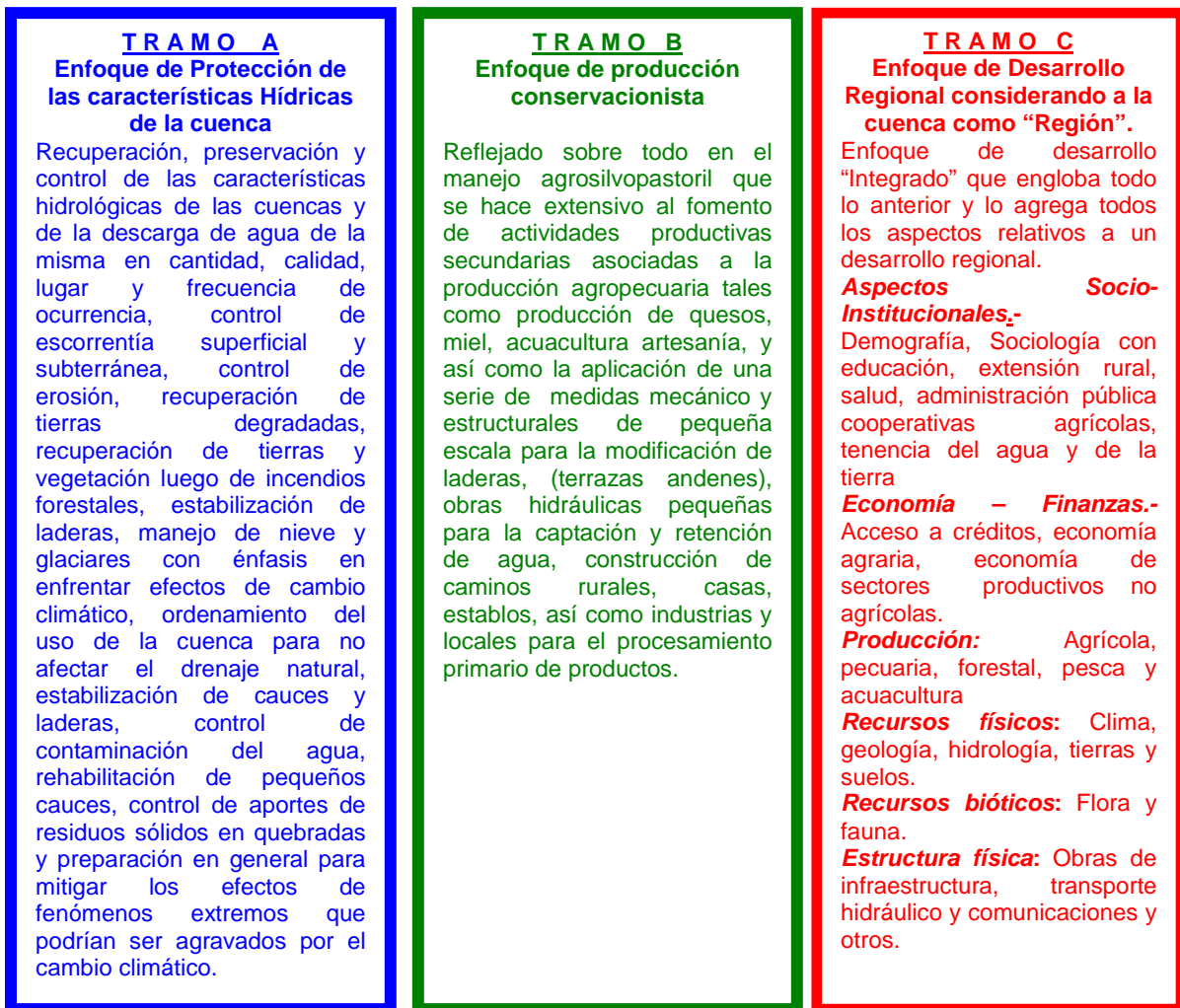
**Tramos con que se puede clasificar los enfoques de gestión y manejo de cuencas hidrográficas (Francke, et al, 2008)**



TRAMO A

TRAMO B

TRAMO C



CRITERIO	TIPOLOGIA DE CUENCAS
<b>Relieve</b>	De montaña Altoandinas De Llano
<b>Posición relativa en la cuenca fluvial</b>	Altas Media Bajas
<b>Orden / Tamaño</b>	Cuenca fluvial u hoya hidrográfica Cuenca hidrográfica Subcuenca Microcuenca
<b>Dirección de la descarga hídrica</b>	Exorreica Endorreica Arreica

**Tabla 4.1. Clasificación General de las Cuencas.** La tabla describe los criterios más comunes bajo los cuales se clasifican las cuencas hidrográficas. Fuente: Francke, et al, 2008.

#### 4.1.2. Caracterización general de las cuencas hidrográficas en Chile

El territorio de Chile, se ubica en la costa occidental de América del Sur, detenta una longitud de 4270 km y un ancho medio de 200 km. La extensa longitud territorial determina una amplia variedad de climas, suelos y biomas. En secuencia de norte a sur se encuentran ecosistemas desérticos, estepáricos, mediterráneos, templados cálidos, templados lluviosos, estepáricos fríos y de tundra (Aguirre, 2009). Los rasgos fisiográficos distinguen un abrupto gradiente altitudinal Oeste-Este: planicie litoral, Cordillera de la Costa, depresión intermedia y Cordillera de Los Andes. La configuración fisiográfica del territorio (constituido entre la Cordillera de Los Andes y de la Costa, con desniveles que superan los 5 mil metros en no más de 200 km) determina cuencas hidrográficas de alta torrencialidad, alta fragilidad en la regulación de los flujos hídricos, alta capacidad erosiva y de transporte de sedimentos, desde continente a mar, particularmente en áreas desertificadas, desprovistas de vegetación y en vastas zonas de montañas (Aguirre, 2009)

Chile es por tanto un país donde el 80 % de su territorio lo conforman terrenos montañosos y el 20 % restante corresponde a valles y planicies litorales, comprendidos por montañas, el mar, lagos, ríos o canales, que quiebran su geografía austral en innumerables islas. Los procesos de erosión y desertificación que afectan a la mitad y a dos tercios del territorio nacional, respectivamente, se encuentran asociados a cuencas hidrográficas de montaña, procesos que contribuyen en épocas estivales a severos daños por sequía y en épocas invernales se generan inundaciones, con efectos devastadores de infraestructura y población urbana, afectando vidas humanas<sup>44</sup> (Aguirre, 2009)

<sup>44</sup> En Chile, los aluviones han sido frecuentes debido a la geografía y a la inexistencia de planes de ordenamiento territorial que conjuguen los riesgos naturales con la habitabilidad en las zonas altamente densificadas. En mayo de 1993, un aluvión procedente de la Quebrada de Macul en la comuna de Peñalolén dejó un saldo de 20 muertos y 4000 damnificados; otros aluviones que dejaron víctimas fatales y millones en pérdidas fueron en Antofagasta en el año 2006, Farellones en septiembre de 2009 y en Copiapó en el presente año (2015).

Debido a la diversidad de climas, suelos, litología y cubiertas vegetacionales –que determinan también distintos comportamientos en los regímenes de escurrimiento– es posible definir zonas hidrográficas relativamente homogéneas, de acuerdo a similitud en caudales y regímenes de escurrimiento, redes de drenaje y situación de las cuencas hidrográficas respecto de unidades hidrológicas.

–  
Basado en estos criterios, el Instituto Geográfico Militar (IGM), según estudios de Niemayer y Cereceda (1984) propone 6 zonas hidrográficas:

- a) Primera Zona Hidrográfica: Ríos de régimen esporádico de la zona hiperárida y árida de Chile (I-III Región).
- b) Segunda Zona Hidrográfica: Ríos en torrentes de régimen mixto en la zona semiárida de Chile (IV – VII Región).
- c) Tercera Zona Hidrográfica: Ríos en torrentes de régimen mixto en la zona subhúmeda de Chile (VII – VIII Región).
- d) Cuarta Zona Hidrográfica: Ríos tranquilos con regulación lacustre en la zona húmeda de Chile (IX – X Región).
- e) Quinta Zona Hidrográfica: Ríos caudalosos trasandinos de Patagonia Septentrional de Chile (XI – XII Región).
- f) Sexta Zona Hidrográfica: Zona de los Campos de Hielo de Patagonia Meridional.

De acuerdo a la Dirección General de Aguas (DGA) del Ministerio de Obras Públicas (MOP), existen en Chile 129 cuencas hidrográficas, siendo las de mayor superficie las de los ríos Loa (II Región), Maipo (Región Metropolitana), Maule (VII Región) y Baker (XI Región), las cuales poseen caudales medios que llegan hasta 900 m<sup>3</sup>/s, superando la mayoría los 400 m<sup>3</sup>/s (Francke, et al, 2008)

Dado que las cuencas definidas por la DGA a lo largo del país tienen importancias muy disímiles desde el punto de vista de sus demandas o del control de sus recursos, estas se subdividieron en tres categorías.

- Cuencas Clase A. Son aquellas cuencas que tienen demandas en por lo menos dos actividades; la mayoría de estas cuencas tienen estaciones de control en el río que origina la cuenca o en sus afluentes. Estas son 48 cuencas.
- Cuencas Clase B. Son aquellas cuencas que solo tienen demandas en una de las actividades antes indicadas. Estas son 24 cuencas.
- Cuencas Clase C.- Son aquellas cuencas que dentro de ella no tienen ninguna demanda o no existen antecedentes ni estudios sobre ellas por lo poco significativas que son. Estas son 28 cuencas. (Gómez, 1996)

Cuenca Hidrográfica (Río)	Región		Superficie (Km <sup>2</sup> )
	Hidrográfica	Administrativa	
San José	1°	I	2.984
Loa	1°	II	31.925
Copiapó	1°	III	19.280
Elqui	2°	IV	9.745
Limarí	2°	IV	11.927
Aconcagua	2°	V	7.537
Maipo	2°	RM	15.380
Maule	3°	VII	20.965
Bío-Bío	4°	VIII	24.262
Bueno	4°	X	15.124
Valdivia	4°	X	11.056
Palena	5°	XI	14.581
Aysén	5°	XI	11.953
Baker	5°	XI	27.931

**Tabla 4.2. Principales cuencas hidrográficas en Chile.** Las cuencas se localizan en una concepción geopolítica – administrativa (localización regional) e hidrográfica que corresponde a una localización geomorfológica y ecológica. Según este estudio las principales cuencas en Chile se ubican desde la 1ª hasta la 5ª región hidrográfica. Administrativamente, la cuenca más grande del país se localiza en la segunda región correspondiendo a la cuenca del Río Loa. Fuente: Francke, et al, 2008.

La presencia de macizos cordilleranos y una línea costera por el oeste, ha hecho que naturalmente, las cuencas en Chile tengan desde cientos hasta miles de km<sup>2</sup> con un enorme potencial de captación de agua y recursos naturales. Su alta torrencialidad ha sido óptima para la construcción de centrales hidroeléctricas, además, la presencia de industrias mineras en la zona norte ha sido en parte posible por la utilización de los recursos hídricos de los cauces provenientes de las altas cumbres y las napas freáticas. Además del desarrollo económico, la acción antrópica ha generado elevados niveles de desestabilización de las cuencas hidrográficas debido a la alteración de cauces, deforestación, pérdida de biodiversidad, erosión, etc.

Riesgos naturales	Depredación de potencial productivo	Conflicto en el uso de los recursos
Inundaciones	Desertificación	Contaminación
Aluviones	Erosión	Eutrofización
Deslizamientos	Incendios	Aumento de demanda de energía eléctrica
	Sobrepastoreo	Aumento de recursos hídricos para riego
	Monocultivos	Sobreexplotación de recursos

**Tabla 4.3. Principales problemas de las cuencas en Chile.** Las cuencas hidrográficas chilenas no solo presentan problemas naturales que alteren su ordenamiento natural, además, están sometidas a la presión humana por la obtención de recursos, sumado a un esquema productivista con fuerte presión económica por los recursos y uso del espacio. Fuente. Francke, et al, 2008.

### 4.1.3. Restauración hidrológica forestal de cuencas hidrográficas

#### 4.1.3.1. Antecedentes básicos de la restauración en cuencas hidrográficas

“Existen tres posiciones diferentes con respecto al significado de la restauración ecológica. La visión fundamentalista consiste en considerar la restauración como un regreso a las condiciones existentes en las comunidades naturales originales de cada región, incluida la diversidad biológica original incluso logrando nuevamente cierta estabilidad sin necesidad de manejo posterior. El retorno a la situación original puede aún ser posible en zonas perturbadas de lugares como reservas de la naturaleza en las que sólo una parte de la comunidad original ha sido alterada; en cambio, en muchos sitios sólo será posible aplicar una segunda opción más práctica y que puede combinarse con actividades productivas. En este caso la restauración ecológica estaría dirigida a tratar de recuperar las principales funciones ambientales del ecosistema original, que permitan mantener la estabilidad en la fertilidad, la conservación del suelo y el ciclo hidrológico, aunque parte de la diversidad se haya perdido y la estabilidad del sistema tenga que ser manejada, y en algunos casos, algunas especies extrañas previamente inexistentes hayan ingresado al área. La restauración del paisaje es la tercera forma de vislumbrar la restauración. En este caso se busca desarrollar un paisaje atractivo y salubre para reemplazar otro que no lo es; por ejemplo, en un relleno sanitario”. (Vásquez, 1999)

Tomando como eje las definiciones anteriores, la restauración hidrológico-forestal de una cuenca constituye un conjunto de actuaciones que tienen como finalidad controlar y revertir la degradación del suelo ocasionada por la erosión hídrica, generada por actividades que han alterado profundamente las cubiertas vegetales permanentes (Trivelli, 2006). Otros autores como Gálvez (2002), describen la restauración como “El proceso de alterar intencionalmente un sitio para establecer un ecosistema. La meta de este proceso es imitar la estructura, función, diversidad y dinámica del ecosistema específico a restaurar”.

Trivelli (2006) define 3 aspectos de acción en una cuenca:

*a) Protección y prevención*

El objetivo se refiere a evitar los procesos de erosión de suelos y de degradación de recursos naturales, los tipos de técnicas y medidas que se ocupan son biotécnicas, medidas de manejo extensivas e hidrotecnias y con costos relativamente bajos

*b) Recuperación y/o rehabilitación;*

el objetivo constituye en detener los procesos de erosión de suelos y degradación de los recursos naturales. Los tipos de técnicas y medidas que se ocupan son biotécnicas, hidrotecnias, medidas de manejo intensivos, obras menores y medidas de conservación y aspectos socioculturales. Se registran costos relativamente altos.

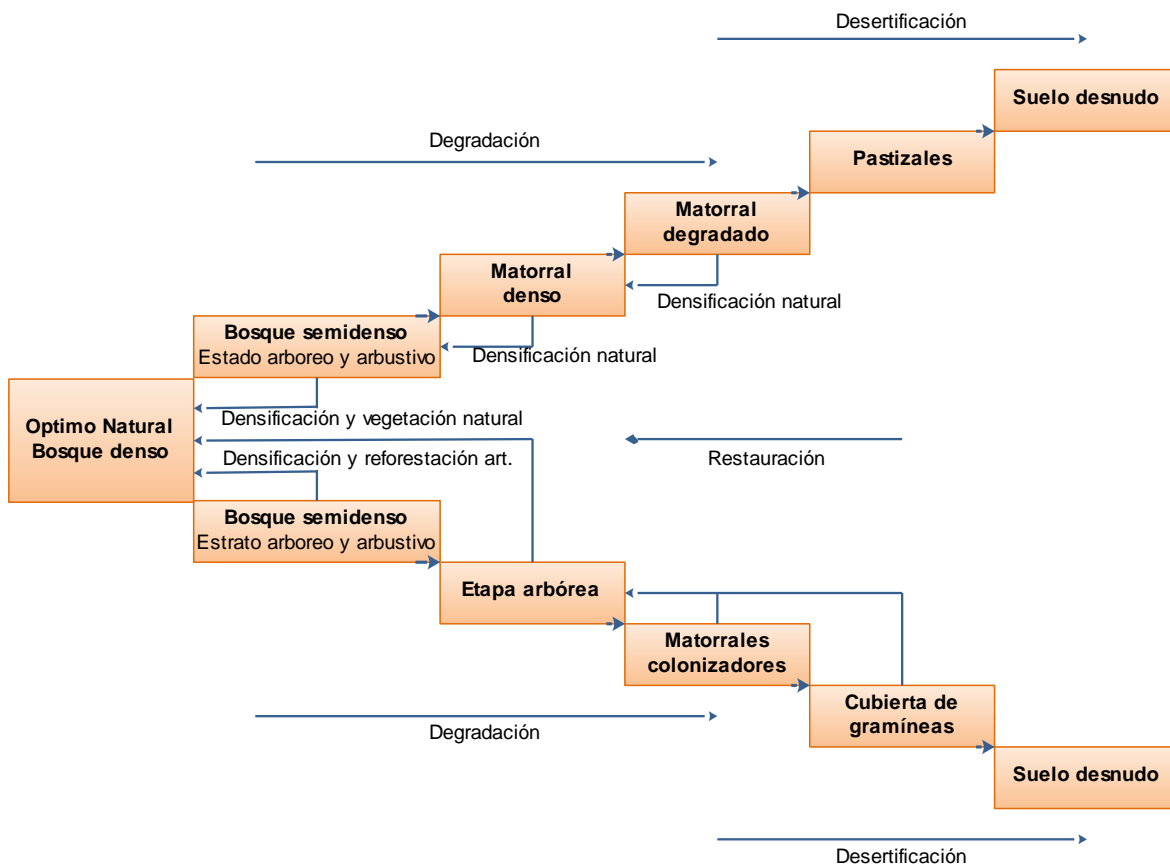
*c) Restauración ambiental;*

el objetivo apunta a revertir totalmente los procesos de erosión y degradación de los recursos naturales. Los tipos de técnicas y medidas que se ocupan son biotécnicas, hidrotecnias de corrección, medidas de manejo tradicional, obras medias y mayores de conservación y aspectos socioculturales y compensaciones económicas. Los costos son muy altos

Las actuaciones restauradoras van encaminadas a controlar la pérdida de suelo y emisión de sedimentos. La pérdida de suelo se produce por la remoción y transporte de las partículas del suelo cuando los agentes erosivos destruyen los lazos que mantienen unidas dichas partículas en el complejo formado por el suelo, e indica la vulnerabilidad del suelo y la emisión de sedimentos, consecuencia de lo anterior, es un índice de la degradación final de la cuenca (De Simón, et al, 1998). La restauración hidrológico-forestal de una cuenca integra las siguientes actuaciones básicas:

- Restauración de la vegetación en la cuenca de recepción.
- Hidrotecnias en los cauces de régimen torrencial.
- Obras de conservación de suelos en terrenos agrícolas.
- Actuaciones estructurales.

La restauración de la vegetación de una cuenca vertiente, es imprescindible para controlar la erosión laminar y en regueros. Por sus características estructurales, el arbolado ofrece mayor protección que cualquier otro tipo de cubierta, pero el arbolado debe tener un estrato de matorral que complete su eficacia protectora.



**Figura 4.3. Modelo de restauración y alternativas de actuación.** Los procesos de restauración de una cuenca hidrográfica comienzan con la etapa de recuperación, el cual, concluye cuando la cuenca (en un estado de equilibrio) es capaz de resistir los procesos de erosión que la afectan y recuperar (en gran parte) las condiciones que tenía inicialmente antes de producirse los procesos erosivos. Fuente: De Simón, et al, 1998.



#### **4.1.3.2. Alteraciones biológicas de la deforestación de cuencas**

La deforestación de las cuencas hidrográficas produce una desorganización de las estructuras de los ecosistemas que dependen de la vegetación forestal y modifica el ciclo del agua y la regulación biológica que ejerce la vegetación en todos sus niveles.

La desorganización de la vegetación afecta directamente a la producción bruta de los sistemas forestales y ocasiona la desorganización de todos los niveles de producción de control y de protección, que dependen de la vegetación forestal, arbórea, arbustiva y de matorral.

Afecta también a las poblaciones que ocupan cada nicho ecológico, incluidas las del suelo, por las alteraciones que produce la erosión y a la recepción directa de la energía incidente. La deforestación ocasiona la elevación de la temperatura en los horizontes superficiales del suelo y la disminución de la humedad en los mismos, por el sobrecalentamiento que se produce con la insolación directa.

La reducción del nivel de protección de las cubiertas vegetales produce un aumento acelerado de la pérdida de suelo por erosión, a la vez que una notable reducción de los aportes de materia orgánica, necesarios para los procesos de edafogénesis (De Simón, et al, 1998).

#### **4.1.3.3. Alteraciones hidrológicas de la deforestación de cuencas**

Como consecuencia de la destrucción de las cubiertas permanentes de una cuenca y su sustitución por otras de composición y estructura diferente y de menor nivel de protección, el drenaje natural de las aguas de escorrentía se desorganiza, haciendo que los flujos superficiales discurren por las líneas de menor resistencia del suelo, y forman nuevas microrredes y regueros, organizando una nueva red de drenaje establecida por el nuevo nivel de cobertura que le proporciona la vegetación al suelo, en la fase de regresión en que se establezca (De Simón, et al, 1998).

Esto ocasiona un aumento de la escorrentía y una intensa erosión laminar y en surcos, que favorecen la descarga de la cuenca por el aumento de caudales sólidos y líquidos, debido a la reducción del índice de protección en la cuenca, y que tiene como consecuencia inmediata el aumento del riesgo de inundaciones en las áreas dominadas de la cuenca. La destrucción de la vegetación de un ecosistema ocasiona perturbaciones en todos los subsistemas dependientes de la vegetación forestal. Los daños que se ocasionan al conjunto de la cuenca hidrográfica dependen directamente del tiempo que se tarda en restaurarla. Con estas consideraciones sobre las consecuencias de la degradación de las cubiertas vegetales permanentes, las actuaciones restauradoras se enfocan en los siguientes aspectos:

- 1º) Proteger al suelo, estableciendo una cubierta vegetal permanente.
- 2º) Organizar la cubierta vegetal, su composición, distribución y estructura desde el comienzo de la restauración.
- 3º) Dinamizar la evolución de la vegetación fomentando la introducción de las especies que forman comunidades con las repobladas.
- 4º) Regular y controlar las escorrentías en la cuenca de recepción y los caudales de avenida en los cauces.
- 5º) Conservar los suelos en los cultivos agrícolas.

Las repoblaciones sobre suelos erosionados deben considerarse como el comienzo de la restauración, y constituyen la etapa más importante y decisiva en los procesos de restauración.

Con la repoblación de los terrenos erosionados se consigue, en principio, frenar y controlar la erosión de los suelos e invertir los procesos de degradación y de la vegetación en fases de evolución. La restauración estará concluida cuando la cuenca pueda alcanzar sus niveles de eficacia naturales en cuanto al control de la erosión.

Dependiendo de las características físicas del medio, calidad del suelo, y características del clima, la vegetación puede alcanzar unos niveles de eficacia muy altos en la protección de los suelos y en el control de la erosión, siempre que esté en equilibrio con los recursos del medio y tenga una composición y estructura que permita la persistencia de las cubiertas vegetales (De Simón, et al, 1998).

Cada cuenca tiene unas características naturales, que establece y limita sus niveles de eficacia, en cuanto a sus posibilidades de regulación y de control de las escorrentías y de los caudales de avenida. Los niveles de eficacia, se condicionan, a su vez, por la cantidad y calidad de sus recursos, especialmente agua y suelo.

Las actuaciones restauradoras, deben aproximar los niveles de eficacia al óptimo natural que tendría la cuenca con las cubiertas vegetales permanentes en su situación más evolucionada. Esta aproximación se puede estimar mediante modelos que simulen el comportamiento hidrológico de la cuenca en las diferentes fases evolutivas de la restauración. Asimismo, para poder simular las actuaciones restauradoras se necesita disponer de unos modelos de evolución de la vegetación, referidos a cada una de las unidades de vegetación representadas en la cuenca, considerando el grado de protección que proporcionan al suelo en cada una de sus fases de evolución (De Simón, et al, 1998).

#### **4.1.3.4. Restauración de la vegetación**

En las zonas mediterráneas semiáridas, las repoblaciones son las actuaciones más eficaces para reconstruir la vegetación de los ecosistemas forestales degradados (Trivelli, 2006). La repoblación debe favorecer la evolución progresiva de la vegetación y crear un sistema forestal estable con el medio; que pueda evolucionar y adaptarse a los posibles cambios del medio y a las necesidades de la sociedad, posibilitando la diversidad de usos y de producciones.

La repoblación puede reconstruir formaciones vegetales heterogéneas, teniendo como base los recursos del suelo y especialmente el agua que puede utilizar la vegetación. Es necesario evitar la creación de extensas masas forestales uniformes y coetáneas, porque estas estructuras homogéneas son artificiales y muy vulnerables al fuego y a las plagas; crean paisajes monótonos y condicionan el uso múltiple de las zonas forestales.

En la repoblación se pueden emplear técnicas de plantación elementales, con herramientas y maquinaria de las comúnmente utilizadas en las actividades agrarias. Pero a su vez la repoblación genera procesos edáficos, hidrológicos y biológicos muy complejos, que es necesario conocer y considerar para el establecimiento de la repoblación y para la gestión de la vegetación repoblada. Para que la repoblación pueda integrarse en el medio biofísico, tiene que identificarse con las condiciones ecológicas, hidrológicas, biológicas y silvícolas del medio y de su entorno; y para que pueda

permanecer se tiene que realizar considerando las condiciones sociales y económicas de las poblaciones rurales. Las especies que se instalen deben integrarse en las series de vegetación como una etapa de su propia evolución, y a su vez no deben causar perturbaciones en su progresión para alcanzar los estados de madurez. No es la repoblación misma la que puede causar impactos sobre el medio ambiente y sobre el paisaje, sino la forma de realizarla.

No se justifica el uso de especies exóticas en las repoblaciones que tengan como finalidad la restauración de la vegetación y la creación de ecosistemas forestales permanentes. La introducción de especies exóticas suele producir un rechazo del sistema ecológico, que activa sus mecanismos de defensa y manifiesta su rechazo en forma de plagas, enfermedades, incendios, etc., que se contraponen a los procesos de autoadaptación al nuevo medio. La flora autóctona de las zonas semiáridas es suficientemente rica y variada en especies arbóreas y de matorral, que están perfectamente adaptadas a las características del clima y a las seculares intervenciones del hombre sobre la vegetación y sobre el medio (además de contribuir mejor a la homeostasis del medio ambiente); por lo que no es necesario acudir a especies exóticas que no mejoran la eficacia de las actuaciones restauradoras a largo plazo. Esto favorecerá las fases de la restauración:

- Creación: Repoblación.
- Formación: Organización silvícola.
- Evolución progresiva: Ordenación de recursos.
- Madurez: Vegetación estable.

En estas fases desarrollan una serie de procesos hidrológicos, edáficos y biológicos, que influyen en la repoblación y producen una interdependencia progresiva entre la vegetación y el medio (De Simón, et al, 1998).

#### **4.1.3.5. Factores y procesos básicos que intervienen en la restauración**

En estas fases se va creando una interdependencia progresiva entre la vegetación repoblada y el medio. En ellas se desarrollan procesos biológicos e hidrológicos que influyen en la evolución de la repoblación y producen una interdependencia progresiva entre la vegetación y el medio.

La distribución y estructura de la repoblación están condicionadas por el clima y por los recursos de agua que puede recibir y retener el suelo. La topografía del terreno influye poderosamente en la cantidad de agua que puede llegar realmente al suelo.

En condiciones iguales de lluvia suelo y vegetación, y en una misma unidad hidrológica, hay diferencias notables entre la cantidad de agua que puede disponer el suelo según sea su estado de conservación y su situación topográfica. La pendiente del terreno genera intensas escorrentías superficiales y lentos flujos subsuperficiales, que dividen el terreno en unidades ambientales distintas atendiendo a la cantidad real de agua que puede recibir y retener el suelo (De Simón, et al, 1998).

Las disponibilidades de agua en el suelo están modificadas por:

- La posición fisiográfica del terreno en relación con las escorrentías,
- El estado del suelo.

La posición fisiográfica del terreno en relación con las escorrentías superficiales y subsuperficiales determina:

- Zonas de impluvio o exportadoras de escorrentías: Vertientes de fuertes pendientes.
- Zonas receptoras de escorrentías: Piedemontes, zonas de sedimentación.
- Zonas de transición.
- Zonas de concentración, que reciben las escorrentías de las dos vertientes: Entorno de la red de drenaje, cañadas y vaguadas.

En las zonas de impluvio, el suelo tendrá menos agua disponible de la que recibe realmente, ya que una parte se pierde por escorrentía. En las zonas de sedimentación (receptoras de escorrentías), el suelo dispondrá además del agua de lluvia, la que le proporcionan las escorrentías de sus impluvios. Las zonas de concentración reciben escorrentías superficiales y subsuperficiales de las dos vertientes del terreno, y el suelo tendrá una mayor cantidad de agua que los suelos de su entorno.

La situación topográfica del entorno de la red de drenaje, hace que sean zonas menos expuestas a la recepción directa de las radiaciones solares, por lo que la evapotranspiración suele ser menor que en las zonas de cabecera, de vertientes y de cumbres. Las zonas receptoras de escorrentías suelen tener mejor suelo y una mayor cantidad de materia orgánica que aumenta su capacidad de retención de agua. En estas zonas la vegetación tiene un mayor desarrollo, lo que permite organizar sus estructuras desde el comienzo de la repoblación, tomando como base el entorno de la red de drenaje, donde se formará un excelente hábitat para la fauna.

Por el estado del suelo, las lluvias de carácter torrencial producen una intensa erosión en los suelos con una cubierta vegetal degradada. Cuando la erosión del suelo alcanza un grado de intensidad alto, superior al que puede tolerar el suelo, la disminución de los horizontes edáficos ocasiona la reducción progresiva de las reservas hídricas que pueden almacenar los suelos (De Simón, et al, 1998).

En el mejor de los casos la degradación edáfica que ocasiona la erosión, conlleva la sustitución de las especies climáticas, más exigentes en agua y en calidad del suelo, por otras más frugales que las sustituyen cuando se degradan las condiciones del medio y el suelo dispone de menos agua y se reduce su potencial biológico.

En los suelos erosionados, la elección de las especies está muy condicionada por la intensidad de la erosión. La restauración de la vegetación tendrá que comenzar repoblando con especies frugales, arbóreas o de matorral, poco exigentes en agua y en recursos, que puedan colonizar el terreno y facilitar la introducción de otras especies de más calidad biológica.

Para que la vegetación repoblada sea estable con el medio y pueda permanecer, tiene que evolucionar de forma progresiva y, si es necesario, realizar tratamientos silvícolas que favorezcan a las especies que se instalan por repoblación. La evolución está muy condicionada por los siguientes factores:

- Capacidad de regeneración de las especies repobladas y la formación de comunidades estables.
- Procesos de competencia ínter e intraespecífica, que pueden retrasar el desarrollo de la repoblación. Estos procesos se pueden controlar con tratamientos que favorezcan a las especies principales y regulen la densidad del arbolado y su grado de cobertura.
- Capacidad de evolución del suelo que se incrementa con los aportes de materia orgánica de la repoblación y con los tratamientos de preparación del suelo que pueden mejorar su estructura y favorecer los procesos de génesis edáfica. (De Simón, et al, 1998).

#### **4.1.4. Instituciones ligadas a la gestión de cuencas en Chile**

Francke y colaboradores (2008) efectuaron un catastro para determinar las instituciones del Estado que directa o indirectamente se encuentran relacionados y vinculadas a la gestión de cuencas hidrográficas.

##### *a) MINAGRI*

El MINAGRI, como Secretaría del Estado encargada de fomentar, orientar y coordinar la actividad agropecuaria y forestal del país en lo que respecta al aumento de la producción nacional y la conservación, protección y acrecentamiento de los recursos naturales renovables, le corresponde la fijación de políticas, la aplicación y propuestas sobre recursos naturales, terrenos, uso y conservación de suelos, recursos hídricos, control de plagas y uso de agroquímicos, del desarrollo al fomento y la protección forestal.

##### *b) CONAF*

CONAF tiene el ámbito de acción para la aplicación de la ley de bosques, ley de Fomento Forestal, la Ley de Áreas Silvestres Protegidas, la Ley de Recuperación del Bosque Nativo y Fomento Forestal y Ley de Areas Silvestres Protegidas del Estado. Tiene un potencial de acción en el 45% del territorio nacional. Se le otorgan facultades para calificar terrenos de aptitud forestal y para explotación de bosque nativos en las diversas cuencas hidrográficas del país. Además se le otorga facilidades de fiscalización y control y en materias de uso del suelo.

##### *c) Servicio Agrícola y Ganadero (SAG)*

El SAG contribuye al desarrollo agropecuario con facultades reguladoras y fiscalizadoras en el ámbito de la ley de protección agrícola, la expansión urbana y programas de recuperación de suelos degradados.

##### *d) Instituto de Desarrollo Agropecuario (INDAP)*

Promueve el desarrollo económico, social y tecnológico de los pequeños productores agrícolas y de los campesinos a nivel de microcuencas, contribuyendo a elevar su capacidad empresarial, organizacional y comercial, su integración al proceso de desarrollo rural y optimizar el uso de los recursos productivos.

*e) MOP*

Por su parte, el MOP, constituye una secretaría del Estado que realiza principalmente acciones a nivel de cauces y manejo de cauces. En este sentido, le compete la conservación de las obras de defensa de terrenos y poblaciones contra las crecidas de agua y regularización de las riberas y cauces de ríos, lagunas y esteros. A la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) le compete la realización de obras de saneamiento y recuperación de terrenos que se ejecute con fondos fiscales. A la Dirección General de Aguas (DGA) le compete normar obras de uso de los recursos hídricos, el otorgamiento de derechos de agua y el monitoreo hidrológico de los cauces.

*f) Ministerio del Medio Ambiente (MMA)*

Este ministerio (sucesor de la CONAMA) es el encargado de la coordinación de la política ambiental del país. De muy reciente data, fue creado con el objeto de abordar el estudio, propuesta, análisis y evolución de todas aquellas materias relacionadas con la protección y conservación del medioambiente, sobretodo con el aumento de las actividades económicas y su incidencia con las matrices ambientales.

*g) Comisión Nacional de Riego (CNR)*

EL CNR, dependiente del Ministerio de Agricultura, tiene por objeto asegurar el incremento y mejoramiento de la superficie regada en el país, para lo cual le corresponde planificar, estudiar y elaborar proyectos integrales de riego, administrar el sistema de fomento a las obras de riego y drenaje.

*h) Ministerio de Bienes Nacionales (MBN)*

El MBN es el encargado según la ley de administración de bienes del estado para crear y desafectar parques nacionales y reservas forestales, categorías de manejo de las áreas silvestres protegidas del estado, previo informe de CONAF- Ministerio de Agricultura.

*i) Ministerio de Desarrollo y Planificación (MIDEPLAN)*

El MIDEPLAN participa en el desarrollo y planificación de políticas sociales del gobierno; Ministerio de Educación, Vivienda y Salud, planifican e implementan planes y programas adaptados al sector rural.

*j) Municipalidades*

Conforme a su ley orgánica constitucional pueden desarrollar funciones de protección del medioambiente en especial colaborar con la fiscalización y el cumplimiento de las normas respectivas sobre urbanización y aprobación de las subdivisiones de predios rústicos. Recientemente se han aprobado normativas para la formulación de planes de regulación y ordenamiento territorial en comunas rurales.

## 4.2. ESTRUCTURA Y PROPIEDADES DEL SUELO

En el país existe una gran variedad de suelos, cuya génesis y evolución ha estado esencialmente caracterizada por factores físico-ambientales, tales como el relieve, extensión latitudinal del territorio continental y la variedad climática. El relieve está caracterizado por la presencia de tres grandes unidades: la Cordillera de los Andes, la Cordillera de la Costa y la Depresión Intermedia. Éstas son muy determinantes hasta el punto de modificar los procesos de génesis de los suelos, alterando lo que podría ser una simple zonificación latitudinal. Un 80% del territorio es montañoso, en consecuencia, existe una tendencia hacia la inestabilidad de los sistemas de interfase superficial que no permite un desarrollo significativo de los perfiles de suelo, que a su vez se traduce en la existencia de suelos jóvenes.

ORDENES DE SUELOS	CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES
<b>Aridisoles</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Suelos formados en regiones áridas</li> <li>• Permanecen secos y desprovistos de vegetación</li> <li>• Las partículas finas son arrastradas por el viento</li> </ul>
<b>Entisoles</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Carecen de horizontes bien desarrollados</li> <li>• Pueden ser suelos jóvenes, sin tiempo para desarrollarse o viejos pero sin desarrollo de horizontes, por corresponder a materiales resistentes a la meteorización</li> </ul>
<b>Alfisoles</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se desarrollan en climas que tienen periodos áridos, por lo tanto, el perfil se presenta seco en gran parte del año</li> <li>• Muestran un horizonte B, textural generalmente</li> </ul>
<b>Ultisoles</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se desarrollan en climas con superávit de precipitación, pero con una estación parcialmente seca. Lo anterior los hace ser lixiviados y pobres en bases.</li> <li>• Fuerte desequilibrio entre la cantidad de bases liberadas por meteorización y las bases removidas por lixiviación.</li> <li>• La agricultura es imposible sin el uso de fertilizantes.</li> </ul>
<b>Espodosoles</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Suelos desarrollados en climas húmedos y fríos, en presencia de vegetación de bosque.</li> <li>• Existencia de un horizonte de eluviación, espódico, en el cual se acumulan sustancias amorfas, tanto coloides orgánicos, como sesquióxidos de aluminio.</li> </ul>
<b>Inceptisoles</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Suelos con un perfil un poco más evolucionados que los entisoles, pero aún con un desarrollo incipiente.</li> <li>• Presentan evidencias de eluviación pero sin poseer un horizonte como tal.</li> <li>• Se presentan en climas húmedos, asegurando un cierto grado de lixiviación en la mayor parte de los años.</li> </ul>

**Tabla 4.4. Principales ordenes de suelos existentes en Chile.** En el país existe una gran variedad de suelos, cuya génesis y evolución ha estado caracterizada por factores físico-ambientales (relieve, extensión latitudinal y variedad climática). Los últimos 3 (Vertisoles, Oxisoles e Histosoles) tienen poca extensión en el territorio nacional en comparación a los anteriores, debido a que necesitan condiciones muy especiales para que se formen o permanezcan como tal. Fuente: INE, 2005.

Continuación tabla 4.4

ORDENES DE SUELOS	CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES
<b>Molisoles</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Suelos en los que se han producido la descomposición y acumulación de altas cantidades de materia orgánica. Esto entrega como resultado un humus rico en calcio.</li> <li>• Son propios de zonas subhúmedas o semiáridas, con vegetación de pradera que asegura aporte de materia orgánica en profundidad.</li> </ul>
<b>Vertisoles</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Suelos formados por arcillas expandibles.</li> <li>• Poseen textura fina, por lo tanto, presentan un carácter plástico adhesivo.</li> <li>• Capacidad de intercambio catiónico alta.</li> </ul>
<b>Oxisoles</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Suelos con horizonte óxico o plintita en los primeros 30 cm de profundidad.</li> <li>• Se presentan en regiones tropicales, en las cuales la intemperización es intensa y la dotación de nutrientes baja.</li> </ul>
<b>Histosoles</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Suelos orgánicos</li> </ul>

A lo anterior se suman los constantes procesos geomorfológicos de actividad reciente, entre otros, los sistemas fluviales que contribuyen a los procesos erosivos de los suelos de laderas y otorgan un importante aporte de material a los suelos de los valles. La extensión latitudinal del territorio implica una gran diversidad climática, que permite la influencia de climas desérticos, templados y fríos, que van desde una aridez extrema a lluvias abundantes. Estas características de zonificación latitudinal, se encuentran notoriamente alteradas por la presencia de los relieves andino y costero (INE, 2005)

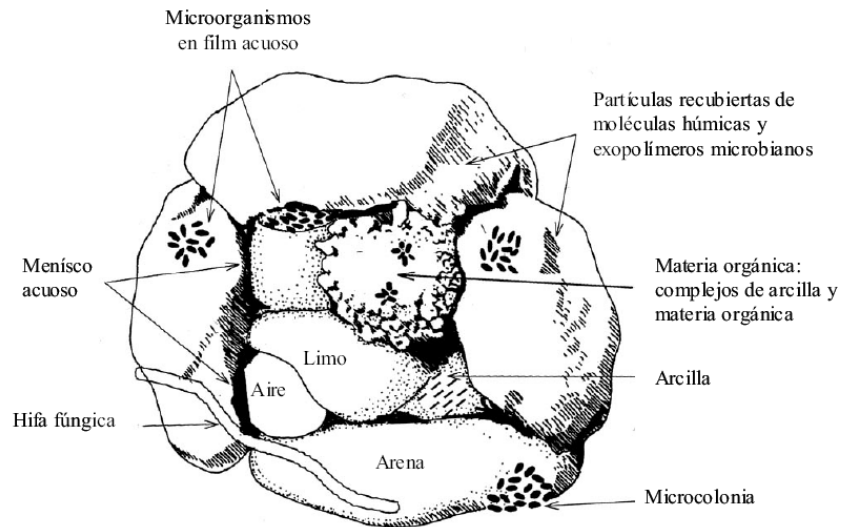
#### 4.2.1. Aspectos físicos del suelo

##### 4.2.1.1. Composición del suelo

El suelo es un medio biogeoquímico de características trifásicas estructurado en una unidad compacta. El agua, aire, minerales, materia orgánica y actividad biológica han interactuado bajo influencia de factores ambientales y han originado el soporte que llamamos suelo, el cual, se ha desarrollado producto de la transformación de sustancias orgánicas y minerales con una organización morfológica y constituye la base para el desarrollo de la vida (Cortés, 2007).

En esencia, el suelo está formado por una fase sólida, compuesta en un 45 % de componentes minerales y un 5 % de compuestos orgánicos. La fase líquida conforma el 50 % restante (25 % de agua y 25 % de aire).

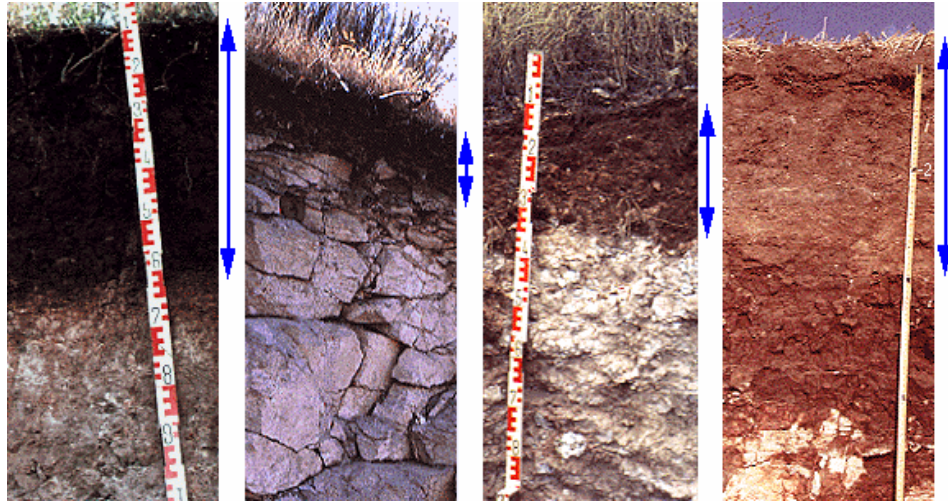




**Figura 4.4. Estructura del suelo.** El suelo es una estructura trifásica unida en una estructura sólida, la cual, es una compleja unión de elementos químicos (orgánicos e inorgánicos) y biológicos que interactúan para formar complejas relaciones en las cuales se sustentan las bases de la vida en el planeta. A elementos como limos y arcillas se unen organismos tanto micro como macroscópicos. Fuente: Viñas, 2005.

HORIZONTE	CARACTERISTICAS
<b>H</b>	Horizonte orgánico que permanece saturado de agua bastantes días al año
<b>O</b>	Horizonte orgánico que contiene por lo menos un 35 % de materia orgánica, por lo general parcialmente descompuesta. No permanece saturado de agua más allá de unos cuantos días al año.
<b>A</b>	Horizonte mineral formado en la superficie o adyacentemente a ésta. Es de color oscuro debido a la presencia de materia orgánica. Esta materia orgánica se encuentra fresca o parcialmente descompuesta. En este horizonte es donde mayor lixiviación se produce, principalmente de sales de hierro, aluminio, manganeso y de compuestos orgánicos sencillos. La materia orgánica descompuesta se halla mezclada con la materia mineral
<b>E</b>	Eluvial, formado por pérdida de Fe, arcilla fina, etc. translocadas al horizonte B.
<b>B</b>	En el horizonte B se puede producir la acumulación de los compuestos de lixiviación procedentes del horizonte A. Este horizonte contiene, entre otros, óxidos de hierro, por lo que acostumbra a tener una coloración entre amarilla y marrón.
<b>C</b>	Material no consolidado, a partir del cual se ha desarrollado propiamente el suelo.
<b>R</b>	Material originario consolidado

**Tabla 4.5. Horizontes del suelo.** Dado que estos horizontes son el resultado de la génesis y evolución del suelo, se denominan horizontes genéticos. Los horizontes genéticos de un suelo se designan por *símbolos alfanuméricos* que convenientemente normalizados permiten asociarlos a un conjunto de características más o menos específicas. Fuente: Cortés, 2007.



**Figura 4.5. Diferentes horizontes del suelo.** Los horizontes tienen espesor y forma variables. Es posible encontrar suelos en los que falta alguno de los horizontes. La delimitación de los horizontes se realiza según diversos aspectos: diferencias de color, textura, estructura, presencia de elementos gruesos, consistencia, plasticidad, dureza, entre otros. Fuente: Cortés, 2007.

#### 4.2.1.2. Características del suelo

##### 4.2.1.2.1. Pendiente

La pendiente del terreno es un elemento importante en la conservación de suelo, constituyéndose en uno de los factores más preponderantes en el fenómeno de la erosión. Los suelos desarrollados en topografía de cerros con pendiente más o menos fuertes tienden a ser suelos más delgados que aquellos desarrollados en planos o en topografías onduladas, porque los primeros favorecen la erosión (Donoso, 1994).

Grados (°)	Porcentaje (%)	Denominación	Clase de Pendiente
0 – 2	0 – 3	Plano	Pendiente suave
2 – 3	3 – 5	Casi plano	Pendiente suave
3 – 6	5 – 10	Ligeramente inclinado	Pendiente moderada
6 – 9	10 – 15	Inclinado	Pendiente moderada
9 – 17	15 – 30	Inclinación pronunciada	Pendiente pronunciada
17 – 30	30 – 58	Inclinación muy pronunciada	Pendiente pronunciada
30 – 45	58 – 100	Escarpado	Pendiente muy pronunciada
>45	>100	Muy escarpado	Pendiente muy pronunciada

**Tabla 4.6. Clases de pendientes.** Las pendientes están en función del grado de inclinación de ésta. Las pendientes de 45° se catalogan con un 100 % y se caracterizan por ser muy pronunciadas y son un factor extrínseco que contribuye a aumentar vulnerabilidad y riesgo del suelo. Fuente: Francke, et al, 2004.

El poder de la escorrentía superficial en las laderas se acrecienta con la inclinación del terreno, especialmente en zonas de pendientes largas y pronunciadas donde la velocidad y energía de la corriente es fuerte. El agua de las lluvias escurre sobre el suelo dirigida por la topografía del lugar. En áreas montañosas u onduladas, el agua escurre por las pendientes y se concentra en las depresiones. Por esta razón, los suelos en pendientes, especialmente si son fuertes, reciben menos agua que aquellos ubicados en planos o en depresiones, en tanto que los terrenos ubicados en estas últimas reciben exceso de agua. Tanto las pendientes fuertes que retienen poco agua en el suelo y son, por lo tanto, secas, como las depresiones que tienen exceso de agua y experimentan un mal drenaje, inhiben el desarrollo del perfil del suelo. Los suelos llamados normales se desarrollan generalmente en terrenos ondulados y de buen drenaje (Donoso, 1994).

#### 4.2.1.2.2. Profundidad

La profundidad del suelo es el espesor de los horizontes que permiten un desarrollo efectivo de las raíces. También es definida como la suma de los espesores de los horizontes A y B, y efectivamente esos son los horizontes cuya profundidad se mide en el terreno. Sin embargo, en el caso de los suelos forestales puede ser conveniente considerar al horizonte C en el concepto de profundidad, ya que la mayor parte de los árboles poseen raíces muy profundas que alcanzan a este horizonte y las cubiertas forestales forman horizontes orgánicos o el mantillo forestal u horizonte O (Cortés, 2007).

Designación	Profundidad (m)
Muy delgado	0,15
Delgado	0,15 – 0,30
Moderadamente profundo	0,30 – 0,60
Profundo	0,60 – 1,20
Muy profundo	Más de 1,20

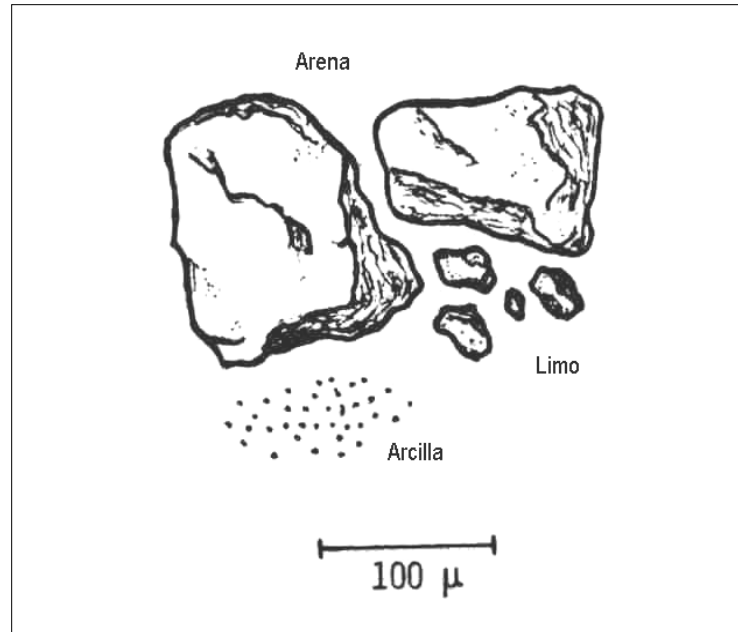
**Tabla 4.7. Designación de los suelos según profundidad.** La profundidad del suelo es el espesor de los horizontes que permiten un desarrollo efectivo de las raíces. También es definida como la suma de los espesores de los horizontes A y B, y efectivamente esos son los horizontes cuya profundidad se mide en el terreno. Fuente: Francke, et al, 2004.

La variación que aquí se indica no es absoluta y debe considerarse exclusivamente para los suelos de secano o rulo. En ellos, la fuente de almacenaje de agua que tiene el suelo a disposición de las plantas parte exclusivamente de la caída pluviométrica.

#### 4.2.1.2.3. Textura

Es la proporción relativa en que se encuentran en una masa de suelo la arena, el limo y la arcilla (Peralta, 1976), las texturas raras veces consisten totalmente de un solo tipo de partículas, generalmente constituyen combinaciones de arena, limo y arcilla. En función de su tamaño la distribución de la textura se clasifica en: arena, arena franca, franco arenoso, franco, franco limoso, limo, franco arcillo arenoso, arcillo limoso y arcilla. Los que llevan el término "arena" pueden ser modificadas por las palabras muy fino, fino, gruesa o muy gruesa. Las principales definiciones verbales son:

- Arena: Contiene 85% o más de arena, el % de limo es más 1,5%, el de arcilla no debe exceder el 15%.
- Limo: Contiene 80% o más de limo y menos de 12% de arcilla.
- Arcilla: Contiene 45% de arcilla o más, menos de un 40% de limo y menos de un 1,5% de arena.



**Figura 4.6. Relación en tamaño de partículas de arena, limo y arcilla.** La relación entre estos componentes (expresada en micras) otorga al suelo propiedades características según la proporción en la cual se encuentran en el suelo. Fuente: Rucks, et al, 2004.

La textura del suelo por sí sola no es determinante de la calidad del sitio, pero juega un papel importante en la determinación del manejo de un área. Se debe a que los suelos de textura franca reúnen óptimas condiciones de las arenas y las arcillas y, por lo tanto son capaces de sostener bosques de mejor crecimiento que en suelos de texturas arcillosas y arenosas. Además, los quiebres bruscos de textura entre horizontes origina casi siempre, problemas en el movimiento de agua y desarrollo de raíces (Peralta, 1976).

#### 4.2.1.2.4. Estructura

Estructura es el grado de ordenamiento espacial de los componentes del suelo. Influye significativamente los regímenes de agua y aire de un suelo, como a su vez su arraigabilidad. Existen microestructuras, solo visibles con microscopio y macroestructuras diferenciables a la vista. Existen dos grandes grupos de estructuras: estructura sin agregación y estructura con agregación.



**Figura 4.7 Clasificación de suelos según estructura con agregación y sin agregación.** . La ordenación espacial de los componentes del suelo da lugar a diferentes propiedades con cualidades específicas y por lo tanto es factible encontrarlos en diferentes climas según sus elementos geológicos y climáticos. Fuente: Francke, et al, 2004.

Suelos	Denominación de las fracciones granulares		Diámetro (mm)
<b>Fracción grueso &gt; 2mm</b>	Redondeadas	Cantos agudos	> 200
	Rodados y guijarros	Piedras gruesas	200 – 63
	Grava gruesa	Piedras medianas	63 – 20
	Grava mediana	Piedras finas	20 – 6,3
	Grava fina	Piedrecillas	6,3 – 2
<b>Fracciones y granulometría de Suelos &lt; 2mm</b>	Arena (A)	Grueso	2 – 0,63
		Medio	0,63 – 0,2
		Fino	0,2 – 0,063
	Limo (L)	Grueso	0,063 – 0,02
		Medio	0,02 – 0,006
		Fino	0,006 – 0,002
	Arcilla (a)	Grueso	
		Medio	< 0,002
		Fino	

**Tabla 4.8. Clasificación de los suelos según el tipo de fracción granulométrica.** Esta clasificación es esencial para conocer aspectos como la infiltración del suelo y su capacidad de uso. De esta manera se pueden establecer mecanismos de gestión. Fuente: Francke, et al, 2004.

#### **4.2.1.2.5. Pedregosidad y rocosidad**

Muchos suelos poseen gran cantidad de piedras o rocas –en el perfil– de distintos tamaños, forma y composición. La mayor o menor cantidad de ellas puede limitar el empleo de maquinarias, afecta la fertilidad y reduce la cantidad de retención de agua aprovechable en los suelos (Peralta, 1976). Para acotar estos conceptos, Cortés (2007) plantea las siguientes definiciones:

*Pedregosidad:* Es la porción relativa de piedras mayores de 25 cm de diámetro, que se encuentran en o sobre el suelo.

*Rocosidad:* Proporción relativa de exposición de la roca firme en un área de suelos, ya sea en afloramiento rocoso o manchas de un suelo muy delgado para uso, sobre suelo rocoso.

Tanto la pedregosidad y la rocosidad en muchos lugares constituye el criterio de separación entre clases arables y no arables. Con exceso de roca (mayor a un 20% del volumen del Suelo), se produce disminución del espacio disponible para las raíces y la cantidad de agua del suelo se ve reducida. El término rocoso se emplea para designar arbitrariamente suelos que tienen rocas fijas (roca firme) y el pedregoso para suelos que tienen fragmentos rocosos sueltos (Cortés, 2007).

### **4.2.2. Aspectos químicos del suelo**

#### **4.2.2.1. Fases y constituyentes del suelo**

##### **4.2.2.1.1. Compuestos minerales**

La presencia y distribución de los minerales dependen principalmente de su mayor o menor estabilidad en el medio edáfico. Las mezclas pueden ser de minerales primarios (derivan directamente del material originario) y secundarios (producto de la transformación de los minerales primarios).

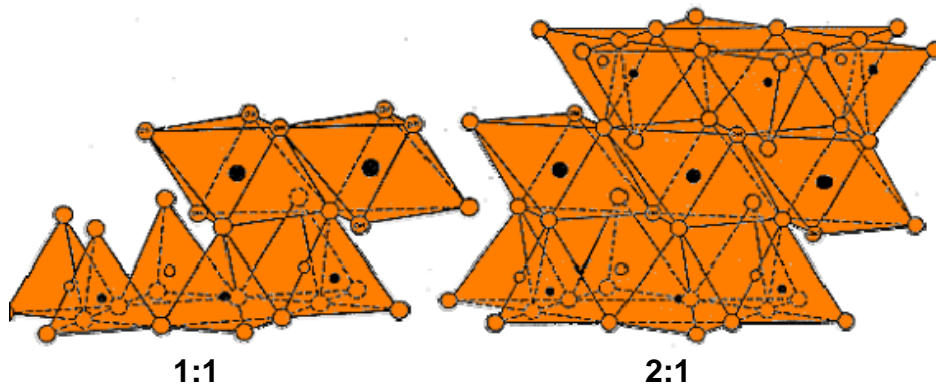
El grupo más importante de entre los minerales primarios del suelo es el de los silicatos. Todos los silicatos están constituidos por una unidad estructural común, un tetraedro de coordinación Si–O. El silicio situado en el centro del tetraedro está rodeado de 4 oxígenos situados en los vértices (Cortés, 2007). Este grupo tetraédrico se encuentra descompensado eléctricamente  $(\text{SiO}_4)^{-4}$ , por lo que los oxígenos se coordinan a otros cationes para compensar sus cargas. Dependiendo del número de oxígenos que se coordinen con otros silicios se forman los distintos tipos de silicatos (según el número de vértices compartidos por tetraedros, que pueden ser 0, 1, 2, 3, y 4) y según sea la coordinación de los otros oxígenos con otros cationes distintos del silicio se forman los diferentes minerales dentro de cada tipo o gran grupo de silicatos. La estructura de los silicatos se forma por repetición de la celda unidad (aislada, en hilera, en lámina o en combinaciones más complejas) y por los cationes que se sitúan entre los tetraedros (Cortés, 2007). Además de los silicatos, hay cuarzo, óxidos y carbonatos entre los minerales primarios. Los minerales secundarios son dominantes en la fracción más fina en tamaño del suelo (arcilla), entre ellos se encuentran los llamados minerales de la arcilla. El grupo de minerales de la arcilla está dominado por los filosilicatos. Estos están constituidos por el agrupamiento de los tetraedros compartiendo entre sí tres vértices (los tres del plano basal) formando planos (Cortés, 2007).



**Figura 4.8. Tetraedros de silicato.** Todos los silicatos están constituidos por una unidad estructural común, un tetraedro de coordinación Si-O. El silicio situado en el centro del tetraedro está rodeado de 4 oxígenos situados en los vértices. Este grupo tetraédrico se encuentra descompensado eléctricamente  $(\text{SiO}_4)^{-4}$ , por lo que los oxígenos se coordinan a otros cationes para compensar sus cargas. Fuente: Cortés, 2007.

El cuarto vértice (el vértice superior) se une a un catión de coordinación octaédrica. Generalmente el catión octaédrico es Mg (capa llamada trioctaédrica) o Al (capa dioctaédrica).

La estructura de estos minerales está formada, en síntesis, por un apilamiento de capas de tetraedros y octaedros, formando estructuras laminares. Según el modelo de repetición se forman dos tipos de láminas con diferentes estructuras. La 1:1 con una capa de tetraedros y otra de octaedros y la 2:1 con dos capas de tetraedros que engloban a una de octaedros. Las capas de tetraedros y octaedros no están aisladas sino que comparten planos comunes en los que los oxígenos están unidos simultáneamente a un Si tetraédrico y a un Mg o Al octaédricos (Cortés, 2007).



**Figura 4.9. Conformaciones de láminas de silicatos.** La estructura de estos minerales está formada, en síntesis, por un apilamiento de capas de tetraedros y octaedros, formando estructuras laminares. Según el modelo de repetición se forman dos tipos de láminas con diferentes estructuras. La 1:1 con una capa de tetraedros y otra de octaedros y la 2:1 con dos capas de tetraedros que engloban a una de octaedros. Fuente: Cortés, 2007.

En las capas tetraédricas y octaédricas se producen sustituciones entre cationes que, cuando son de distinta valencia, crean déficit de carga; para compensarlos son atraídos otros cationes que se introducen entre las láminas, son los llamados cationes interlaminares. Dependiendo del déficit que se origine, de donde se produzca (capa tetraédrica u octaédrica) y de los cationes interlaminares atraídos, aparecen las distintas especies minerales: caolinitas, serpentinas, micas (moscovita, biotita, illita), esmectitas (montmorillonita), vermiculita, clorita, sepiolita y vermiculita, principalmente. (Cortés, 2007)



La cantidad y naturaleza de los minerales de la arcilla dependen de tres condiciones del medio: el drenaje, la alternancia estacional humectación-deseccación y el contenido de elementos alcalinotérreos en el material originario.

El estudio de los minerales de la arcilla se justifica por el papel de estos minerales en la química del suelo, por su condición de coloides se trata de coloides electronegativos, y su importancia en el estudio de la génesis y el desarrollo de los suelos. Junto a los minerales de la arcilla, óxidos e hidróxidos de silicio, hierro, aluminio y manganeso, y carbonatos secundarios constituyen el conjunto de los minerales secundarios del suelo.

La meteorización o alteración de los minerales primarios para dar origen a los minerales secundarios está regida por las características de los enlaces químicos, la estructura de los cristales y las condiciones del medio, en especial del contenido en agua del suelo. Los productos de la alteración incluyen: cationes solubles que pueden pasar al complejo absorbente, cationes menos solubles que evolucionan hacia formas insolubles, primero amorfas, luego cristalinas, y geles mixtos que evolucionan cristalizando en forma de arcillas mineralógicas.

El grado de estabilidad de los minerales va a ser responsable de que la composición mineralógica de las fracciones gruesas (arenas) y la de las finas (arcillas) sea distinta. Mientras las arenas constituyen una fracción muy estable (el gran tamaño de los granos de las arenas implica que su superficie específica sea reducida respecto a su volumen) y en ellas predominan los granos de minerales heredados, poco transformados, los minerales de la fracción arcilla se caracterizan por su gran superficie específica (partículas de muy pequeño tamaño, casi toda ella es superficie), que les confiere una gran reactividad química. (Cortés, 2007)

#### **4.2.2.1.2. Compuestos orgánicos**

La materia orgánica, además de ser un indicador de la fertilidad del suelo, mejora la estructura edáfica, la cual, a su vez, influye en la formación de micro y macroagregados, la continuidad de poros hacia la superficie y la infiltración de agua a todo el perfil (Caravaca et al, 2001). Por otra parte, mejora las condiciones de los suelos minerales (Ibarra, 2007); en los arenosos incrementa la capacidad de retención de agua y de nutrimentos, mientras que en los arcillosos los hace menos pesados y mejora su labranza (Edward, 2000).

La materia orgánica está constituida por:

a) *Organismos vivos*, entre los que tienen especial importancia los microorganismos (conjunto de la microflora, bacterias responsables de los ciclos del fósforo, nitrógeno, carbono, azufre, etc., y determinadas algas, hongos, líquenes) y otros elementos faunísticos (lombrices, artrópodos, etc...)

b) *Productos residuales*, derivados de aquellos, que pueden ir desde la materia orgánica fresca hasta los compuestos húmicos más evolucionados. (Cortes, 2007).

Se trata de una fracción minoritaria, pues rara vez excede del 5 %, que influye de forma decisiva en los procesos de formación del suelo y, por ende, en las propiedades más importantes del mismo y tiene un importante papel en la retención de contaminantes o en la descomposición de los mismos.



El recuento de bacterias siempre suele ser mayor en la rizósfera que en otras zonas del suelo carentes de raíces. Esto se debe a que las raíces secretan cantidades considerables de azúcares, aminoácidos, hormonas y vitaminas, lo que provoca un crecimiento intenso de bacterias y hongos. Se sabe que tanto la abundancia como la diversidad de microorganismos en el suelo, depende directamente del horizonte del suelo. Se estima que, en un gramo de suelo en buen estado, se pueden encontrar hasta 600 millones de bacterias y entre 15 y 20 millones de especies distintas; en suelos desérticos el número de bacterias disminuye hasta 1 millón, que se distribuirían entre 5 y 8 mil especies. La transformación de la materia orgánica fresca que se inicia por una descomposición a cargo de la biomasa microbiana, discurre por dos vías: la mineralización y la humificación, que no terminan en sí mismas (Cortes, 2007).

El humus se forma durante la descomposición microbiana de los residuos vegetales y animales, por degradación de los componentes celulares, y en la síntesis de ciertos productos por los organismos del suelo. Esta transformación conduce a la liberación en el medio de diversas formas minerales ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NH}_4^+$ , etc.) y a la formación de compuestos húmicos (heredados, transformados o de neoformación), a través de la secuencia ácidos fúlvicos, ácidos húmicos pardos, ácidos húmicos grises (muy estables), y humina, en proporciones relativas que dependen de la composición química de los precursores, de la actividad microbiana, de la presencia de determinados componentes minerales del suelo (Ca, Fe, Al y arcillas mineralógicas), del contenido en agua, del pH y del manejo del suelo (Cortes, 2007)..

TIPO DE HUMUS	CARACTERISTICAS
<b>Poco evolucionados</b>	Son propios de condiciones climáticas extremas en los que la actividad biológica es muy débil. En ellos se observan grandes cantidades de restos vegetales con estructura reconocible. Las sustancias húmicas predominantes son las huminas heredadas procedentes de las paredes bacterianas; aunque pueden presentar pequeñas cantidades de ácidos fúlvicos.
<b>Evolucionados de neoformación</b>	Son propios de climas más suaves con una actividad biológica elevada. La presencia de restos vegetales reconocibles es muy escasa. Las sustancias húmicas predominantes son las formas maduras, estables y poco o nada móviles con abundancia de ácidos húmicos grises.
<b>Evolucionados bioclimáticos</b>	Son muy similares a los anteriores solo que su formación está muy influida por las condiciones climáticas, de vegetación e incluso de material original. Ello provoca una desviación en su formación y les otorga características especiales.
<b>Hidromorfos</b>	Son humus poco evolucionados a causa de la hidromorfía reinante y de la anoxia que conlleva; ello impide el desarrollo de microorganismos aerobios que son los encargados de los procesos de polimerización y condensación de las sustancias húmicas. Presentan grandes cantidades de restos reconocibles de musgos y líquenes que constituyen la flora predominante en estas condiciones.

**Tabla 4.9. Tipos de humus según su grado de evolución y sus condiciones de formación.** El humus se forma durante la descomposición microbiana de los residuos vegetales y animales, por degradación de los componentes celulares, y en la síntesis de ciertos productos por los organismos del suelo. Fuente: Cortés, 2007.

Si bien un aporte de materia orgánica al suelo mejora las propiedades físicas del mismo, actúa como la reserva principal de nutrimentos (Navarro y Navarro, 2000) y permite que las partículas se agrupen en forma de agregados (Morgan, 1977); además, reduce considerablemente la erosión del suelo (Kirkby y Morgan, 1984); pero, un aporte excesivo dificulta la descomposición y mineralización de la materia orgánica del suelo. Siendo la capacidad de descomposición de materia orgánica del suelo entre el 70 y el 95 %, se recomiendan, dependiendo de la composición de los suelos, aportes de 25 toneladas por hectárea y año de materia orgánica (valor orientativo). Para que la descomposición tenga lugar se precisa una concentración de oxígeno elevada. Un exceso de materia orgánica origina condiciones anaeróbicas que retrasan y perjudican el desarrollo de los elementos vegetales y provoca la aparición de sustancias tóxicas en el medio. La cantidad de oxígeno absorbido por un suelo es del orden de 1.3 a 9 ton/día/ha y según el contenido de humedad (Cortes, 2007). La mineralización de los residuos orgánicos en el suelo hace que los elementos nutritivos se liberen de forma gradual como elementos inorgánicos que pueden precipitar quedando en solución o pueden ser retenidas por mecanismos que dependerán de las características físico-químicas del suelo.

#### 4.2.2.2. Fertilidad

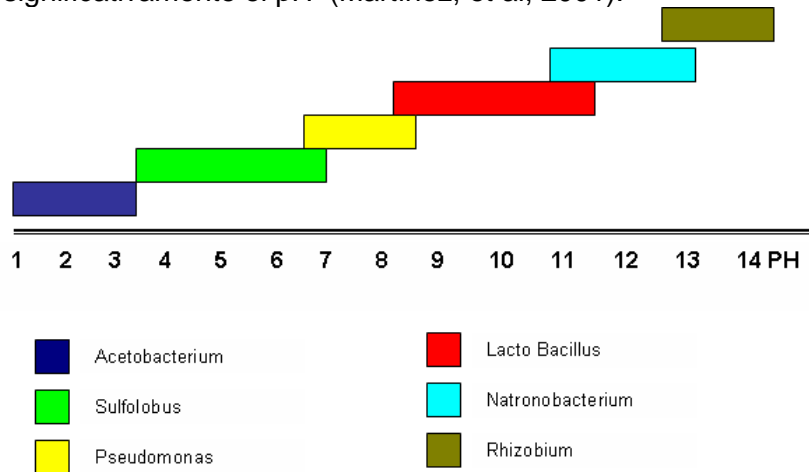
Es una propiedad que se refiere a la cantidad de alimentos que pasean, es decir, a la cantidad de nutrientes. Un suelo fértil es aquel que contiene los elementos nutritivos que las plantas necesitan para su alimentación, estos alimentos los adquiere el suelo enriqueciéndolos con materia orgánica. Un suelo pobre o carente de materia orgánica es un suelo estéril y por lo tanto es improductivo.

ELEMENTOS	PROPIEDADES
<b>Nitrógeno</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ayuda al desarrollo de las plantas</li> <li>• Da al follaje el color verde</li> <li>• Ayuda a que se introduzcan buenas cosechas</li> <li>• Es el elemento químico principal para la formación de las proteínas.</li> </ul>
<b>Fósforo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ayuda al buen crecimiento de las plantas</li> <li>• Forma raíces fuertes y abundantes</li> <li>• Contribuye a la formación y maduración de los frutos.</li> <li>• Indispensable en la formación de semillas.</li> </ul>
<b>Potasio</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ayuda a la planta a la formación de tallos fuertes y vigorosos.</li> <li>• Ayuda a la formación de azúcares almidones y aceites.</li> <li>• Protege a las plantas de enfermedades.</li> <li>• Mejora a la calidad de las cosechas.</li> </ul>
<b>Calcio</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ayuda al crecimiento de la raíz y el tallo de la planta</li> <li>• Permite que la planta tome fácilmente los alimentos del suelo.</li> </ul>
<b>Magnesio</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ayuda a la formación de aceites y grasas</li> <li>• Es el elemento principal en la formación de clorofila, sin la cual la planta no puede formar azúcares.</li> </ul>

**Tabla 4.10. Propiedades de distintos elementos en las capacidades del suelo.** Las características de un suelo para ciertas aplicaciones agrícolas están en relación directa con los componentes que este tenga. Más específicamente, con los elementos químicos y mineralógicos que estén presentes. Fuente: Guerrero, et al, 1998.

### 4.2.2.3. PH

El pH es importante para el desarrollo de los microorganismos degradadores, siendo el rango más adecuado el comprendido entre 6 y 8. La variación del pH puede alterar la biodegradación debido a que altera múltiples procesos edáficos como la movilidad de metales pesados y la interferencia en los sitios de intercambio catiónico (Martínez, et al, 2001). A un Ph alto, los metales deben ser inmovilizados, aumentado su adsorción para disminuir su toxicidad en los microorganismos. La variación del pH del suelo afecta a la solubilización y absorción/adsorción de los contaminantes y de los iones. Las formas catiónicas  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Ca}^{2+}$  son más solubles a pH ácido, mientras que las formas aniónicas  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}^-$ ,  $\text{PO}_3^-$ , y  $\text{Cl}^-$ , son más solubles a pH alcalino (Viñas, 2005). En general, el pH óptimo para las bacterias heterótrofas es neutro, mientras que es más ácido para los hongos. Si bien, el pH altera la biodegradación; el exceso de hidrocarburos no modifica significativamente el pH (Martínez, et al, 2001).



**Figura 4.10. Rango de pH de Microorganismos.** Los microorganismos son excelentes indicadores del pH de un suelo por lo que los distintos géneros microbianos tienen distintos rangos de pH, debido a que sus estructuras están aptas para trabajar con distintas concentraciones de protones o hidróxidos ya sea en un medio terrestre o acuático. Fuente: Cortes, 2007.

Característica	pH
Fuertemente básico	> 9.0
Moderadamente básico	8.0 – 9.0
Ligeramente básico	7.4 – 8.0
Neutro	6.6 – 7.4
Ligeramente ácido	6.0 – 6.6
Moderadamente ácido	5.0 – 6.0
Fuertemente ácido	< 5.0

**Tabla 4.11. Características del suelo según los rangos de pH.** Los suelos se comportan como elementos buffer por lo que no tienen grandes cambios de pH, estos se mueven por lo general entre 5 y 9, aunque en algunos casos pueden tomar valores que escapen a este rango. Un suelo es considerado fuertemente básico cuando es superior a 9 y fuertemente ácido si es inferior a 5. Fuente: Cortés, 2007.

### 4.2.3. Caracterización microbiológica del suelo

#### 4.2.3.1. Antecedentes Generales

La red de poros formada como resultado de la asociación de las partículas minerales (arenas, limos y arcillas) y la materia orgánica, muestra una gran variedad de tamaños y espacios, lo que condiciona el tipo y la diversidad de las poblaciones microbianas existentes (Sessitsch, et al, 2001).

El crecimiento microbiano más importante tiene lugar en la superficie de las partículas del suelo, normalmente en la rizósfera. Tan solo un pequeño agregado de suelo contiene microambientes muy diferentes, por lo que es posible encontrar microorganismos muy distintos. De estos microorganismos la mayoría están adheridos a las partículas del suelo formando micro colonias. En términos generales se encuentran del orden de  $10^6$ – $10^9$  bacterias cultivables por gramo de suelo, mientras que los hongos se encuentran en dos órdenes de magnitud menos como unidades formadoras de colonias, pero representan una parte importante de la biomasa del suelo (Alexander, 1977; Atlas y Bartha 1997).

Sin embargo, la estructura de la población microbiana en los microhábitats (poros) del suelo, aún sigue siendo poco conocida (Sessitsch, et al, 2001), y además se estima que tan solo un 0,1-1% de los microorganismos son cultivables (Amann, et al, 1995).

La organización estructural de las partículas del suelo, confiere una heterogeneidad espacial para los microorganismos, que se caracteriza por la presencia de diferentes sustratos, nutrientes, concentraciones de oxígeno, contenido de agua líquida, así como de un pH variable (Ladd, et al, 1996). Este hecho implica que en un suelo se puedan encontrar una gran variedad de poblaciones microbianas con capacidades metabólicas distintas, condicionadas también por la biodisponibilidad de las distintas fuentes de carbono y energía, que a su vez está condicionada por las características fisicoquímicas propias de cada suelo (Kästner, 2000).

Uno de los principales factores que influyen en la acción microbiana es la disponibilidad de agua. Este es un componente del suelo que presenta una gran variabilidad ya que depende de la composición del suelo, la lluvia, el drenaje y la cubierta vegetal. El estado nutricional también es un factor importante. La mayor parte de ésta se lleva a cabo en las capas de la superficie rica en materia orgánica. El número de microorganismos del suelo depende del equilibrio de los nutrientes presentes.

En la subsuperficie, que puede extenderse cientos de metros por debajo de la superficie del suelo, también hay microorganismos. Aunque el número de células es mucho menor que en la superficie, en la mayoría de los suelos profundos se encuentra una gran variedad de microorganismos, principalmente bacterias. Por ejemplo a 300 mt de profundidad en pozos de perforación se han encontrado conjuntos de bacterias que incluye anaerobios estrictos, como bacterias sulfato reductoras, metanógenos y homoacetógenos, y diversos anaerobios estrictos y facultativos. Los microorganismos que habitan estos ambientes profundos deben tener acceso a nutrientes porque el agua llega hasta su hábitat, sin embargo tienen actividades metabólicas mucho menores que aquellas en hábitats naturales. Hay pruebas que la actividad metabólica prolongada de estos microorganismos que viven enterrados pueden causar la mineralización de compuestos orgánicos y liberar productos a las aguas subterráneas.

Estos organismos presentan un potencial enorme en la biodegradación in situ de sustancias tóxicas que alcanzan las aguas subterráneas por lixiviación<sup>45</sup>.

Grupo de bacterias	Genero	Importancia ambiental
<b>Bacterias de descomposición</b>	Pseudomonas Flavobacterium Zooglea  Clostridium Micrococcus  Methanobacterium Mathanococcus Mathanosarcina	Degrada compuestos orgánicos Degrada proteínas Organismo formador de floculos en plantas de lodos activados Producen ácidos grasos a partir de materia orgánica en un digestor anaerobio Producen metano gaseoso a partir de ácidos grasos en un digestor anaerobio
<b>Bacterias nitrificantes</b>	Nitrobacter Nitrosomonas	Oxidan compuestos nitrogenados inorgánicos
<b>Bacterias desnitrificantes</b>	Bacillus Pseudomonas	Reducen nitratos y nitritos a nitrógeno gaseoso u oxido nitroso
<b>Bacterias fijadoras de N</b>	Azotobacter Beijerinckia	Capaces de fijar el N <sub>2</sub> a NH <sub>3</sub>
<b>Bacterias sulfurosas</b>	Thiobacillus	Oxida el azufre y el hierro
<b>Bacterias reductoras de sulfato</b>	Desulfovibrio	Interviene en la corrosión de tuberías de hierro
<b>Bacterias fotosintéticas</b>	Chlorobium Chromatium	Reducen sulfuros a azufre elemental
<b>Bacterias férricas filamentosas</b>	Sphaerotilus	Dan volumen a los lodos en las plantas de lodos activados
<b>Bacterias férricas oxidantes del hierro</b>	Leptothrix	Oxidan el hierro ferroso

**Tabla 4.12. Bacterias importantes en el medio ambiente.** Muchas bacterias tienen una importancia fundamental en los ciclos biogeoquímicos, ya sea, en el medio terrestre o acuático. La oxidación o reducción de compuestos químicos contribuye el flujo de materia y energía en los ecosistemas. Fuente: Henry y Heinke, 1999.

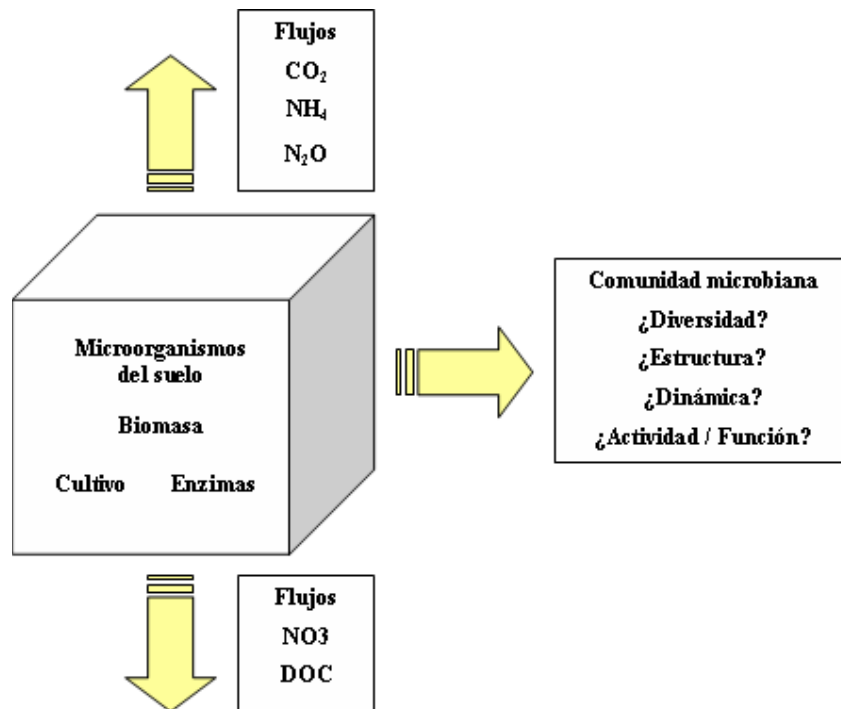
#### 4.2.3.2. Distribución bacteriana en los suelos

Los organismos del suelo no se distribuyen al azar sino que siguen patrones espaciales de agregación, a escalas diferentes (desde mm a mt) que se superponen. Esta estructuración obedece al efecto causado por diferentes factores de control y es totalmente dinámica (Ettema, et al, 2002). Utilizando técnicas de observación de secciones ultrafinas de suelo mediante microscopía electrónica, tomografía, análisis geoestadístico y la elaboración de modelos, especialmente basados en fractales, se ha demostrado que la distribución de las bacterias edáficas está altamente estructurada, y que esta estructuración es importante para la funcionalidad del suelo. Las bacterias se organizan en microcolonias compuestas de pocas células que pueden pertenecer a diferentes morfotipos (Nunan, et al, 2003). Factores como la presencia de raíces,

<sup>45</sup> [www.Microbiologiaambiental.cl](http://www.Microbiologiaambiental.cl)

pequeños agregados, nutrientes y poros parecen gobernar la distribución de bacterias en microhábitats. La complejidad del suelo como ecosistema (nivel microscópico incluido) junto con las especiales particularidades de los microorganismos, tales como su tamaño microscópico y las dificultades para una diferenciación basada en su morfología, habían proporcionado una visión del mundo microbiano edáfico como una caja negra de la cual se sabía que cumplía una función aunque no se conociese su contenido (Nogales, 2005).

La cantidad y clase bacteriana depende del suelo y practica agrícola; en la pradera es superior que en un suelo de cultivo vegetal, por la mayor cantidad de raíces y nivel de materia orgánica disponible derivada de la mineralización restos vegetales. El contenido de materia orgánica del suelo influye en la densidad bacteriana, mayor en suelo cultivado que en un virgen. Si el cultivo vegetal es adecuado para la proliferación bacteriana la que inverna en suelo congelado algunas mueren, o por selección natural soportan baja temperatura, en el ártico permanecen congeladas de 9 a 0 meses del año (Whiteley, 2003). En localidades que no alcanzan temperatura mayor de 10°C se detectan cifras que exceden a 10<sup>6</sup>/g, incluso cuando la temperatura permanece por debajo del punto de congelamiento durante meses esas bacterias en latencia, hasta el deshielo de primavera para activarse (Baath, 1998). En el desierto es el extremo: dominan los bacilos con esporas, ya que la para la célula vegetativa esta condición es desfavorable (Van der Wolf, 2000). La condición meteorológica en cualquier año altera la secuencia estacional usual, un verano lluvioso y caliente o en otoño helado-seco causa fluctuación de la población bacteriana por la combinación humedad y temperatura (Assih, 2002).



**Figura 4.11. El suelo como una caja negra.** Si bien se conocen ampliamente los organismos que habitan en el suelo, aún hay importantes preguntas que resolver en cuanto a la composición y estructura de las comunidades microbianas edáficas, los cambios que se producen en dichas comunidades en respuesta a diferentes factores ambientales y/o perturbaciones y finalmente, el papel funcional de los diferentes tipos de microorganismos que integran la comunidad. Fuente: Nogales, 2005.

Profundidad cm.	Aerobias	Anaerobias	Actinomicetos
3 – 8	7,800	1,950	2,080
20 – 25	1,800	379	245
35 – 40	472	98	48
65 – 75	10	1	5
135 – 145	1	0.4	–

**Tabla 4.13. Distribución de bacterias en horizontes de un perfil de un suelo.** Las bacterias alcanzan su máxima densidad en los primeros centímetros de suelo, prevaleciendo las bacterias aeróbicas en los primeros estratos. Fuente: McCaig, 2001.

La profundidad del suelo afecta la densidad bacteriana. En la superficie es escasa por la acción bactericida de la luz solar, siendo abundante en los primeros centímetros pero posteriormente disminuye con la profundidad (Hastings, 2000). La mayoría de los cambios asociados en el perfil, se explican la alteración biológica, fluctuación en la cantidad de carbono orgánico y O<sub>2</sub> disponibles, al igual que la humedad, el pH, los minerales y el CO<sub>2</sub>.

#### 4.2.3.3. Tipo de nutrición bacteriana en el suelo.

Las bacterias se subdividen en clases taxonómicas, morfológicas y fisiológicas. Para clasificar bacterias con base a sus necesidades nutricionales, existen grupos que requieren para reproducirse de: factores de crecimiento como uno o varios aminoácidos, vitaminas B o la mezcla compleja de factores de crecimiento. Un décimo de las bacterias en el suelo se reproduce en medio de cultivo mínimo, los otros nueve décimos demandan de algún factor de crecimiento para alcanzar su máximo proliferación; el 10% necesita aminoácidos, un número similar vitamina B, el 30% demanda una mezcla compleja de estos factores, un porcentaje elevado de bacterias debe usar vitaminas para su reproducción (Griffiths, 2000).

Vitaminas	Bacterias que excretan proteínas (%)	Bacterias que requieren vitaminas (%)
Tiamina	28,0	44,9
Biotina	14,0	18,7
Ácido pantotónico	32,7	3,70
Ácido fólico	26,2	1,80
Acido nicotínico	30,8	5,60
Riboflavina	27,1	1,80
Piridoxina	18,7	1,80
Vitamina B12	14,0	19,6
Una o más vitaminas	37,4	54,2

**Tabla 4.14. Porcentaje de incidencia de bacterias en suelo que requieren y que excretan vitaminas.** La tabla indica el grado de interdependencia biológica, por la utilización de compuestos sintetizados por otra bacteria como aminoácidos y vitaminas del complejo B, lo anterior es importante para los heterotróficos del suelo y explica porque el extracto de suelo y raíz son considerados como factores de crecimiento para la vida microbiana y animal de ese ambiente. Fuente: Lee, 2000.

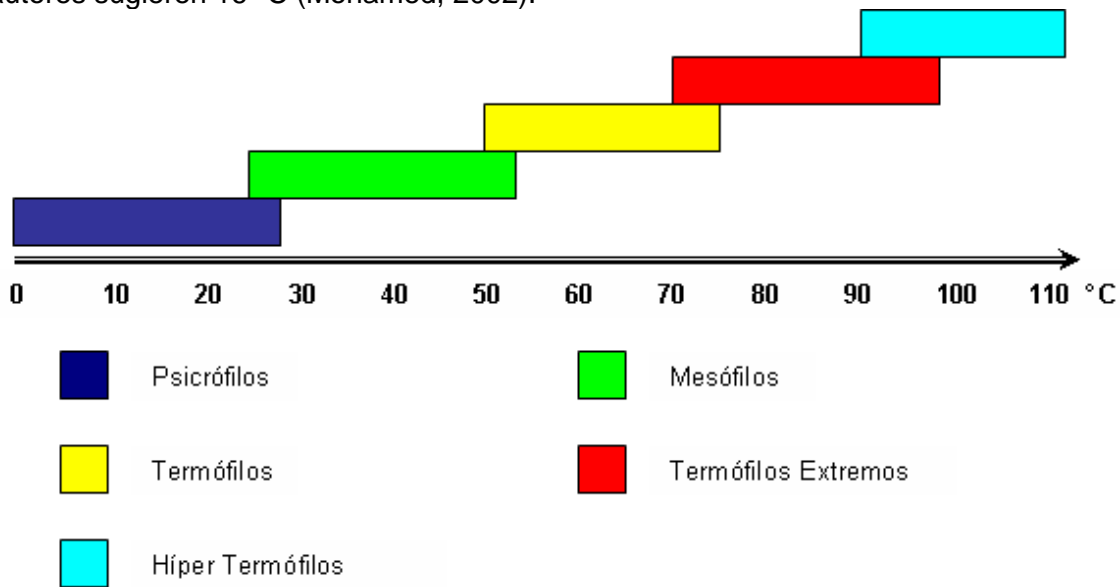
Las bacterias del suelo se dividen en tres grupos respecto a la fuente de energía y de carbono que necesitan para reproducirse: heterotróficas o quimioorganotroficas, los cuales requieren de compuestos orgánicos de C, que le sirvan como fuente de energía y para crecer; las fotoautotróficas crecen al usar como fuente de energía de la luz del sol y las quimiolitotróficas que se multiplican al oxidar elementos o compuestos inorgánicos, estas dos últimas fijan CO<sub>2</sub> como fuente de carbono.

Las algas, las plantas superiores como algunos géneros de bacterias son fotoautotróficos lo cual es de importancia en la agronomía por sus efectos sobre la producción agrícola (Axelrood, 2002). Las quimiolitótrofas obligadas tienen ciertos géneros y especies que solo oxidan compuestos y/o elementos inorgánicos, sus fuentes de energía están limitadas a minerales como: *Nitrosomonas* con el amonio, *Nitrobacter* con el nitrito y *Thiobacillus* con minerales reducidos de azufre, los facultativos oxidan tanto minerales en estado de reducción química como carbono orgánico (Curtis, 2002).

#### 4.2.3.4. Factores ambientales que determinan el desarrollo bacteriano

##### 4.2.3.4.1. Temperatura

La temperatura influye marcadamente en la velocidad de degradación; dependiendo del tipo de microorganismos disponibles, ya que, afecta la actividad metabólica. La temperatura aumenta la energía cinética de las moléculas aumentando las colisiones entre ellas y por ende aumentando las probabilidades de orientación y reacción entre ellas. Normalmente las temperaturas más adecuadas se encuentran entre los 20 °C y 40 °C, aunque algunos autores sugieren 16 °C (Mohamed, 2002).



**Figura 4.12. Rango de temperatura de crecimiento bacteriano.** Las bacterias tienen distinto rango de tolerancia a la temperatura, esto debido a que los distintos géneros bacterianos tienen distinta temperatura óptima en la cual sus enzimas alcanzan su máximo rendimiento antes que éstas se desnaturalicen. Fuente. Cortés, 2007.

La velocidad de degradación aumenta con la temperatura, por lo que un incremento de la misma resulta útil para muchas cohortes bacterianas. Cuando supera los 40 °C se produce una disminución de la actividad microbiana, o bien se produce una rotación



poblacional hacia especies más resistentes a las altas temperaturas, como ocurre en los procesos de compostaje en donde se alcanzan temperaturas de 65 °C. En el caso de bajas temperaturas del suelo (por debajo de los 15 °C) se ha encontrado actividad de ciertos microorganismos principalmente del género *Gallionella*, ésto indica que si bien las velocidades disminuyen, las reacciones no se detienen. La mayor parte de los estudios realizados indican que las condiciones mesófilas son las óptimas para la biorremediación en suelos contaminados (Menn, et al, 2000), por este motivo, las *Pseudomonas* son las bacterias más utilizadas en este proceso. No obstante también se ha descrito biodegradación de compuestos hidrocarbonados en temperaturas extremas: 0 °C en suelos árticos y alpinos (Margesin y Schinner, 1997), 5 °C en suelos subárticos (Whyte, et al, 1999) y hasta 60 °C por una cepa termófila de *Bacillus stearotherophilus*, aislada de un suelo del desierto de Kuwait (Sorkon, et al, 1993).

#### **4.2.3.4.2. Humedad**

El agua es importante para el desarrollo de los microorganismos limitando en forma severa la biodegradación, ya que, el agua actúa como medio de transporte de nutrientes y oxígeno a la célula. Este factor es importante en zonas de alta oscilación térmica (en Chile, ésta es una condición natural en los suelos de secano interior de los valles de la depresión intermedia y las zonas desérticas de la zona norte alejadas de la costa). Es conveniente mantener una humedad del orden del 70 % de la capacidad de campo, ya que, un déficit impide el crecimiento de los microorganismos, disminuyendo el transporte de nutrientes y de contaminantes, así como también la migración bacteriana a través del suelo limitando su desarrollo. El exceso de agua en el suelo desplaza al oxígeno residente en los poros del suelo, generándose con mayor facilidad condiciones anaeróbicas, al agotarse el oxígeno disuelto en el agua. No obstante el nivel óptimo de humedad depende de las propiedades de cada suelo, el tipo de contaminación y si la biodegradación es aeróbica o anaeróbica. En general, en suelos de granulometría fina (elevado porcentaje de arcilla y limos) suele utilizarse una proporción cercana al 40 % de la capacidad de campo, mientras que para suelos arenosos suele utilizarse una humedad cercana al 60 % de la capacidad de campo (Menn, et al, 2000).

#### **4.2.3.4.3. Biodisponibilidad**

La degradación de un compuesto orgánico en el suelo depende de una serie de factores; entre ellos, la actividad de los microorganismos y la transferencia de masa desde el suelo hasta los microorganismos. La relación entre estos factores se conoce como biodisponibilidad. En los suelos uno de los factores limitantes para la biodegradación es la transferencia de masa, ya que, los microorganismos de los suelos ricos en sustancias orgánicas suelen tener amplias capacidades biodegradativas al estar expuestos a una gran variedad de compuestos orgánicos diferentes. Por lo tanto, la adsorción, absorción, desadsorción, disolución y difusión son fenómenos propios de la transferencia de masa, que condicionan la biodisponibilidad. La reducción de la biodisponibilidad en el tiempo puede explicarse por múltiples causas, por ejemplo, las reducciones y oxidaciones químicas que incorporan el nutriente dentro de la materia orgánica, difusión lenta dentro de los poros muy pequeños y adsorción en las paredes de los mismos y también la formación de películas semirígidas alrededor de los líquidos en fase no acuosa con una alta resistencia a la transferencia de masa en acuíferos o la formación de uniones covalentes con la materia orgánica e inorgánica el suelo. Otro fenómeno que afecta de manera negativa a la biodisponibilidad de los contaminantes es el envejecimiento (ageing), el cual, es un parámetro importante en suelos con alto contenido de materia

orgánica, aunque, la población microbiana mantenga intacta su potencial catabólico (Breedveis y Sparrevik, 2001). En síntesis, es evidente, que si el sustrato no es disponible para la célula, esta no lo podrá utilizar como sustrato.

#### **4.2.3.4.4. Nutrientes Inorgánicos**

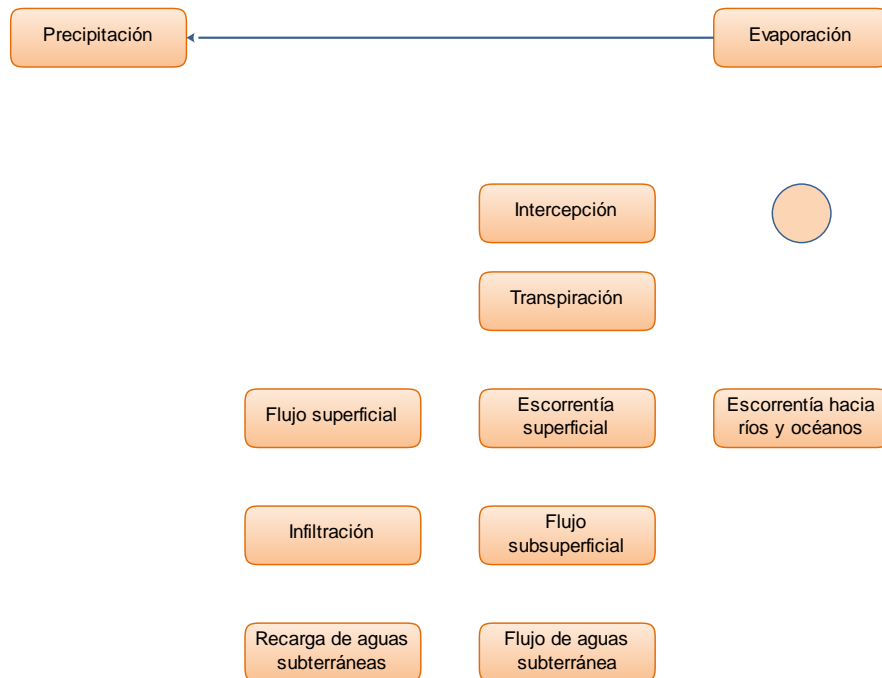
Los nutrientes inorgánicos son sustancias químicas necesarias para el desarrollo de los microorganismos y se pueden dividir en cuatro grupos: fuente de carbono, fósforo, nitrógeno y oligoelementos o elementos minoritarios (micronutrientes).

Los metales y las sales en altas concentraciones intoxican a los microorganismos o actúan como biocidas (una alta concentración molar exocelular de sales, cambia la gradiente osmótica generando plasmólisis en las bacterias) entre estos se encuentran metales pesados, sodio en alta concentración, sales inorgánicas ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ , etc...). En general la presencia de sales y metales disminuye la velocidad de degradación en forma importante a menos que se disponga de microorganismos tolerantes (como las halófitas) en el lugar de tratamiento o se haya producido una bioaumentación con consorcios residentes. Los microorganismos no degradan contaminantes inorgánicos, solo pueden alterar su forma química (por ejemplo, sulfuros insolubles transformarlos a sulfatos más solubles o a la inversa) de forma de inmovilizarlo o eliminarlos del lugar mediante lixiviación de los compuestos solubles por el agua de lluvia o volatilización. Algunos microorganismos fijan sobre su estructura celular metales en forma activa (metabólica) o pasiva (adsorción) reteniéndolos e impidiendo que migren. Esta característica es importante para los procesos de tratamiento biológico de aguas contaminadas con metales tóxicos (Viñas, 2005). Las concentraciones de nitrógeno y fósforo asimilables presentes en el suelo, suelen ser limitantes para un incremento y activación de la población bacteriana, mientras que otros nutrientes esenciales como el  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  ya están presentes en cantidades suficientes en el suelo (Menn, et al, 2000). La adición de fuentes de nitrógeno y fósforo inorgánicos, generalmente tiene un incremento positivo, aumentando las poblaciones microbianas y las tasas de biodegradación (Dott, et al, 1995). Las proporciones molares de C:N descritas en la bibliografía respecto al contenido de carbono a degradar son muy distintas: 100:10 a 1000:10 para la biodegradación de suelos contaminados por hidrocarburos y dentro de este intervalo se han descrito proporciones C:N de 600:10; 500:10 y de 100:10:1 a 300:10:1 (siendo éste último dígito para el fósforo). Aunque en general la adición de fuentes inorgánicas de nitrógeno y fósforo al suelo es beneficiosa para los procesos de biodegradación, la adición de nutrientes inorgánicos puede tener efectos inhibitorios en la interacción química con los minerales del suelo (el amonio se puede unir a las arcillas por intercambio catiónico y el fosfato puede unirse y precipitar con iones calcio, hierro y aluminio) (Viñas, 2005).

#### **4.2.4. Aspectos hidrológicos del suelo**

##### **4.2.4.1. Ciclo hidrológico**

“En la biósfera, el ciclo del agua no tiene principio ni fin y sus diversos procesos ocurren en forma continua. El agua se evapora desde los océanos y desde la superficie terrestre para volverse parte de la atmosfera; el vapor de agua se transporta y se eleva en la atmosfera hasta que se condensa y precipita sobre la superficie terrestre o los océanos” (Chow, et al, 1994).



**Figura 4.13. Sistema hidrológico global.** El ciclo hidrológico está formado a su vez por 3 subsistemas: el proceso de agua atmosférica que contiene los procesos de precipitación, evaporación, intercepción y transpiración; el sistema de agua superficial que contiene básicamente las escorrentías y el sistema de agua subsuperficial contiene los procesos de infiltración, recarga de acuífero, flujo subsuperficial y flujo de agua subterránea. Fuente: Chow, et al, 1994.

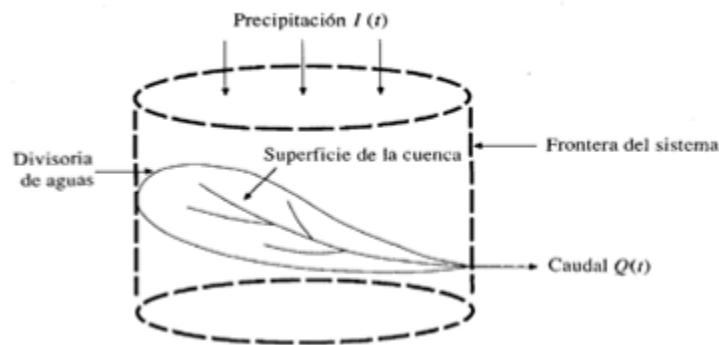
“El agua precipitada puede ser interceptada por la vegetación, convertirse en flujo superficial sobre el suelo, infiltrarse en él, correr a través del suelo como flujo subsuperficial y descargar en los ríos como escorrentía superficial. La mayor parte del agua interceptada y de escorrentía superficial regresa a la atmosfera mediante la evaporación. El agua infiltrada puede percolar profundamente para recargar el agua subterránea de donde emerge en manantiales o se desliza hacia ríos para formar la escorrentía superficial y finalmente fluye hacia el mar o se evapora en la atmosfera a medida que el ciclo hidrológico continua” (Chow, et al, 1994).

El ciclo del agua asegura un suministro constante hacia los niveles superficiales y subsuperficiales del suelo para asegurar el abastecimiento de vida en la tierra, sin embargo, la mayor parte del agua –aproximadamente un 96,5 %– se encuentra en los océanos lo que hace imposible su utilización en forma directa<sup>46</sup>. Solo un 2,5 % del total de agua es dulce, sin embargo, la mayor parte de esta reserva se encuentra en los polos y napas subterráneas lo que restringe aún más su utilización. Todo esto hace que a pesar de su abundancia, el agua es un recurso natural escaso, además, su presencia en una región está determinada por patrones como la topografía, geología y vegetación. En los últimos dos siglos la actividad humana ha invadido progresivamente el medio ambiente natural del agua alterando el equilibrio dinámico del ciclo hidrológico e iniciando nuevos procesos y eventos” (Chow, et al, 1994).

<sup>46</sup> Para utilizarla se debe desalinizar, lo cual, se realiza mediante osmosis inversa; tratamiento que eleva su costo a niveles que hace imposible su utilización en países subdesarrollados.

#### 4.2.4.2. Aspectos hidrológicos de una cuenca hidrográfica

“Si la superficie y el suelo de una cuenca se examinan en detalle, el número de caminos que pueden seguir los cauces, y por ende, el comportamiento del agua en la cuenca resulta enorme. A lo largo de estos caminos, la forma, la pendiente, y la rugosidad pueden cambiar continuamente y estos factores también pueden variar en el tiempo a medida que el suelo se humedece. De manera análoga, las precipitaciones varían aleatoriamente en el tiempo y en el espacio. Debido a estas complicaciones no es posible describir los procesos hidrológicos a través de leyes físicas exactas. Si se utiliza el concepto de sistema, el esfuerzo se dirige a la construcción de un modelo que relacione entradas y salidas en lugar de llevar a cabo la difícil tarea de representar en forma exacta los detalles del sistema, los cuales pueden ser desconocidos o no significativos desde un punto de vista práctico” (Chow, et al, 1994).



**Figura 4.14. La cuenca como sistema hidrológico.** La precipitación puede tomar múltiples caminos y formas en la cuenca, los cuales es muy difícil es de estimar y cuantificar en forma precisa, por lo que la forma más óptima de analizar los procesos hídricos es mediante la representación de un sistema en el cual se deben conocer las corrientes de entrada y salida de agua de la cuenca, además de los procesos generales que ocurren como la escorrentía, evaporación, etc... Fuente: Chow, et al, 1994.

La precipitación sufre una distribución al ingresar a un ecosistema: parte del agua queda retenida en la vegetación, principalmente en el dosel, lo que se denomina capacidad de almacenamiento (Lee, 1980; Zeng et al., 2000; Cantú y González, 2002), otra escurre a través de la vegetación hasta al suelo (escurrimiento fustal) y otra fracción llega directamente al suelo. Esta última es la que más agua aporta al suelo, ya sea en bosques nativos o plantaciones (Almizry, 1997; Hot, 1998; Huber e Iroumé, 2001), siendo la más importante para las obras de restauración hidrológico – forestal que tienen por objetivo la cosecha de agua.

En el caso de la intercepción, Lee (1980) la define como la fracción de agua que se evapora desde la superficie externa de la masa vegetal. Este elemento es de primordial importancia ecológica para los ecosistemas y es vital para determinar el comportamiento hidrológico de una cuenca. La vegetación incide notablemente en la cantidad de agua que llega directamente al suelo por precipitaciones, ya que, a mayor superficie fustal, mayor será la intercepción (Hoover, 1962) y por ende, menor la cantidad de agua que llegue directamente al suelo, sin embargo, bajo estas condiciones la captura de agua en el ecosistema será directamente proporcional a la cobertura vegetal presente en la cuenca. Otros elementos como el ángulo de las

hojas, la hidrofobia de hojas y cortezas y la capacidad de almacenaje de arbusto y capas inferiores de vegetación, influyen notablemente en la intercepción de las precipitaciones (Crockford y Richardson, 2000).

La importancia de la intercepción en la hidrología global de la cuenca radica en que influye en la cantidad de agua que llega al suelo en forma directa y por ende en la cantidad de agua que infiltra hacia la zona subsuperficial del suelo, además, la cobertura vegetal incide en la disminución de la escorrentía y en un aumento en la captura del agua. Esto último implica que la intercepción será distinta en las microcuencas de trabajo dada la distribución y tipo de árboles presentes. Parte de los árboles presentes en las microcuencas (principalmente en la 2) corresponde a *Pinus radiata* con una edad no mayor a 20 años, elemento importante para determinar la intercepción debido a que las pérdidas por este factor aumentan con la edad de las plantaciones (Huber e Iroumé, 2001).

Además de la intercepción, un componente importante es la evapotranspiración, la cual, es baja en los ecosistemas nativos de Chile y es alta en plantaciones exóticas principalmente como *Pinus radiata* (Huber y Trecaman, 2004) y *Eucalyptus globulus* (Huber, et al, 2010). “La eficiencia del uso del agua es el rendimiento que tiene un ecosistema vegetal por unidad de agua evapotranspirada. La eficiencia del uso del agua se expresa como su valor recíproco, llamado tasa de transpiración. Ella indica la cantidad de agua evapotranspirada ( $m^3$ ) para producir una unidad de volumen ( $m^3$ ) de materia seca o maderable o fustal” (Eastham, et al, 1990). “De esta manera, la tasa de transpiración de una plantación forestal indica la cantidad de agua que fue extraída del suelo (evapotranspiración neta) para producir 1  $m^3$  de incremento fustal. La evapotranspiración neta está regulada por las características del suelo, de la cubierta vegetal y de las condiciones climáticas. Entre las climáticas sobresalen la radiación solar, las precipitaciones, la temperatura y la humedad del aire” (Calder, 1998).

En las edáficas destacan, entre otras, la capacidad de retención de agua útil del suelo y la velocidad de infiltración (Abrahamson, et al, 1998). “Estas dos últimas características determinan la cantidad y el tiempo que el agua del suelo está disponible para la vegetación” (Huber y Trecaman, 2004).

Otro elemento importante es la infiltración, la cual está influida por el tipo de suelo y textura entre otros elementos. Suelos ricos en arcilla tienen infiltración más lenta, mientras que suelos muy arenosos tienen baja capacidad de campo, una alta tasa de infiltración y una baja cantidad de agua aprovechable (Huber y Trecaman, 2004). “Por esto, el comportamiento de un suelo saturado de agua es diferente que el de un suelo seco ante una precipitación de una intensidad determinada. En el suelo saturado se estará produciendo escorrentía superficial y subterránea, mientras que en el seco, si tiene una buena capacidad de infiltración tardará más en iniciarse la escorrentía superficial” (Martínez, et al, 1996).

El agua se mueve en el suelo a través de dos procesos: la percolación que es la circulación general del agua dentro de un suelo y la infiltración que se refiere exclusivamente a la penetración vertical del agua en el suelo, lo que se produce cuando el agua de lluvia pasa a través de la superficie del suelo hacia su interior (Martínez, et al, 1996).

Martínez y autores (1996) definen la dinámica del agua en el suelo en función de tres parámetros: (a) las formas en que se presenta el agua en el suelo, (b) la capacidad de almacenamiento y (c) la distribución del agua en el suelo.

La forma en que se presenta el agua en el suelo puede ser según los siguientes aspectos:

- Agua de constitución: propia de las partículas minerales del suelo
- Agua higroscópica: constituidas por pequeñas gotas absorbidas por las partículas del suelo. No es asimilable por la vegetación.
- Agua capilar: se eleva por capilaridad sobre la superficie de las aguas subterráneas. Puede ser aislada si no está en contacto con la napa freática y continua cuando lo está.
- Agua gravitacional: corresponde al agua denominada libre, se mueve afectada por la acción de la gravedad y constituye la capa freática o zona de saturación

La capacidad de almacenamiento se determina por los siguientes conceptos:

- Capacidad de campo: cantidad que contiene un suelo cuando tras una fuerte precipitación ha drenado ya toda el agua gravitacional.
- Capacidad de retención de agua: máxima cantidad de agua gravitacional que puede contener un suelo
- Cantidad de agua asimilable por las plantas: corresponde a la fracción de agua capilar del suelo que no se encuentra fuertemente retenida

En cuanto a la distribución del agua en el suelo, esta puede distribuirse de la siguiente manera:

- Zona de saturación: es la zona que corresponde al agua gravitacional, Su límite superior define la cota o superficie piezométrica, de forma que dicha superficie se encuentra sometida a la presión atmosférica.
- Zona de aireación: en esta zona se distingue:
  - Franja capilar: constituida por el agua capilar continua, se encuentra por encima de la zona de saturación. Mientras que en terrenos arenosos puede ser muy pequeña, en suelos limosos puede ocupar varios metros de espesor.
  - Zona de retención: se encuentra agua capilar aislada, aire y vapor de agua.
  - Zona de evapotranspiración: zona de influencia de la radiación solar y del sistema radical de las plantas (Martínez, et al, 1996).

#### **4.3. CARACTERIZACION Y DINAMICA DEL CARBONO**

El carbono es un elemento esencial para los seres vivos por lo que circula en la biósfera a través del denominado “ciclo del carbono”, en el cual, existe un intercambio de este elemento entre la biosfera y las matrices ambientales (Ordoñez, 1999); en un complejo sistema que forma parte de los ciclos biogeoquímicos (Chiappa, et al, 2002);

“Los bosques, a través de sus procesos fisiológicos tales como la fotosíntesis, absorben  $110 \text{ Gt Caño}^{-1}$ , mientras que mediante la respiración emiten  $55 \text{ Gt Caño}^{-1}$  y por medio de

la descomposición<sup>47</sup> emiten de 54 a 55 GtC año<sup>-1</sup>. El suelo, el detritus y la turba almacenan 172 GtC aproximadamente. Los océanos absorben aproximadamente 93 Gt Caño<sup>-1</sup> y emiten por procesos químicos y biológicos cerca de 90 Gt Caño<sup>-1</sup>, además de que se considera que conservan grandes cantidades de carbono (38,500 GtC). Estos dos ciclos eliminan de la atmósfera casi tanto carbono como el que le aportan de forma natural; pero actividades humanas como la deforestación y la quema de combustibles fósiles están provocando un aumento en la cantidad de carbono atmosférico en unos 3 Gt Caño<sup>-1</sup> (Ordoñez, 1999).

Deposito	Cantidad (Ton)
Organismos vivos	10 <sup>12</sup>
Sedimentos	10 <sup>16</sup>
Carbón	10 <sup>12</sup>
Petróleo	10 <sup>11</sup>
Otras formas	10 <sup>15</sup>

**Tabla 4.15. Cantidad estimada de carbono presente en fase sólida.** Las cantidades presentes en toneladas muestran las cantidades de carbono estimadas presentes en fase sólida, por lo que se omite el carbono atmosférico. Las cantidades representan el carbono formado por bacterias anaeróbicas y el ciclo biogeoquímicos respectivo. Fuente: Spiro, et al, 2004.

#### 4.3.1. Los bosques como reservorio de carbono

La superficie forestal estimada en la Tierra es de 4.1x10<sup>9</sup> ha, donde las áreas naturales protegidas abarcan el 2.3%, menos del 10% de las áreas que se encuentran bajo manejo. Aproximadamente el 37% de carbono se encuentra en latitudes bajas (0° a 25° lat.), 14% en las medias (25° a 50° lat.) y 49% en las altas (50° a 75° lat.), esto significa que la proporción de carbono capturado por la vegetación y suelo difiere en cuanto a su ubicación geográfica respecto de su latitud (Dixon, et al, 1996).

“Los biomas boreales circumpolares tienen una cobertura de 2x10<sup>9</sup> ha en el hemisferio norte, y contienen 800 GtC en reservas de carbono contenido en la biomasa, detritus, suelo y turba. En los ecosistemas forestales boreales, la biomasa, el detritus, la turba (con 419 GtC) y el suelo (con 290 GtC) contienen en su totalidad 709 GtC” (Apps, et al, 1993). “Los bosques tropicales almacenan en la vegetación y el suelo 159 GtC y 216 GtC, respectivamente, para un total de 375 GtC” (Brown et al, 1993).

Actualmente la deforestación y la degradación forestal son factores que inciden en el cambio climático global, puesto que alteran el equilibrio circulante de CO<sub>2</sub>. Además generan grandes problemas locales y regionales, como el incremento de la erosión y la disminución de las napas freáticas, entre otros. Sin embargo, se ha estimado que, combinando estrategias de conservación forestal con proyectos de reforestación en todo el mundo, los bosques podrían resultar en un sumidero neto de carbono durante los próximos cien años (IPCC, 2005).

<sup>47</sup> La descomposición y la respiración son los dos emisores naturales de los bosques. Sus emisiones suman un total aproximado de 110 GtC año<sup>-1</sup>, por lo que en ausencia de deforestación hay un balance entre el carbono emitido y el capturado.

### 4.3.2. El carbono en ecosistemas forestales

“El CO<sub>2</sub> atmosférico es incorporado a los procesos metabólicos de las plantas mediante la fotosíntesis. Este CO<sub>2</sub> participa en la composición de todas las estructuras necesarias para que el árbol pueda desarrollarse (follaje, ramas, raíces y tronco). Al crecer, éste incrementa su follaje, ramas, flores, frutos y yemas de crecimiento (que en su conjunto conforman la copa) así como su altura y el grosor de su tronco. La copa necesita espacio para recibir energía solar sobre las hojas, lo que da lugar a que las copas de los árboles compitan por esta energía. Esto origina, a su vez, un dosel cerrado. Los componentes de la copa aportan materia orgánica al suelo, que al degradarse se incorpora paulatinamente y da origen al humus estable, éste, a su vez, aporta nuevamente CO<sub>2</sub> al entorno. Simultáneamente, los troncos al ir aumentando su diámetro y altura alcanzarán un tamaño aprovechable en términos comerciales, pudiéndose extraer productos como tablas, tablones y polines, que darán origen a subproductos elaborados, como muebles y casas. Estos productos finales tienen un tiempo de vida determinado, después del cual se degradan aportando CO<sub>2</sub> al suelo y/o a la atmósfera. Durante el tiempo en que el CO<sub>2</sub> se encuentra constituyendo alguna estructura del árbol —y hasta que es enviado nuevamente al suelo o a la atmósfera—, se considera almacenado. En el momento de su liberación (ya sea por la descomposición de la materia orgánica y/o por la quema de la biomasa) el CO<sub>2</sub> fluye para regresar al ciclo del carbono” (Ordoñez, 1999).

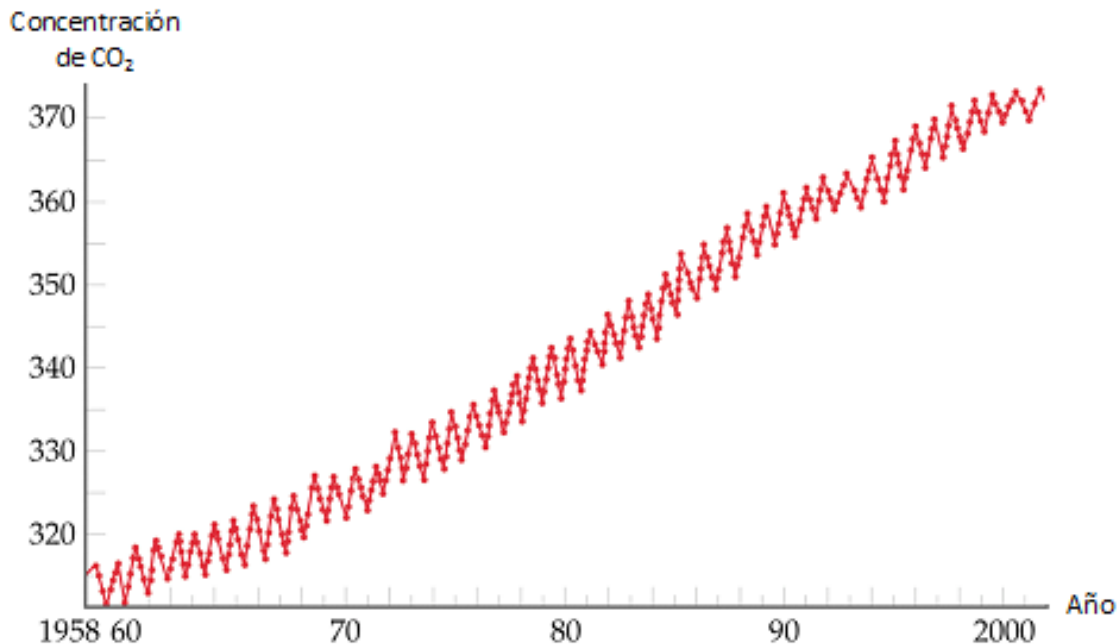
DEPOSITO DE CARBONO	CARACTERISTICAS
<b>Vegetación (Cv)</b>	Suma del contenido en la biomasa aérea y la que se halla en la biomasa de las raíces. La biomasa aérea comprende el tronco, las hojas, las ramas y el follaje, mientras que el carbono contenido en las raíces es definido como biomasa de las raíces
<b>Descomposición (Cd)</b>	Es el contenido en la materia orgánica que se encuentra en proceso de descomposición; es originada cuando las estructuras vegetales como las hojas, las ramas o el tronco son depositadas en el suelo
<b>Suelo (Cs)</b>	Es el carbono contenido en las capas que conforman el suelo forestal. Se origina por la fragmentación de la roca madre meteorizada por el establecimiento de un organismo vegetal que con el tiempo forma capas por depositación de materiales. Al irse acumulando éstas y compactando, almacenan una cierta cantidad de carbono, misma que aumentará por la continuidad del proceso de formación del suelo
<b>Producto (Cp)</b>	Son los productos forestales que almacenan carbono durante todo el tiempo de vida del producto. Cuando éste termina, el carbono se incorporará al ciclo dependiendo del proceso de degradación del producto. Mientras mayor sea la vida media de un producto forestal el carbono estará almacenado por más tiempo

**Tabla 4.16. Depósitos de carbono.** En la biósfera el carbono se encuentra en todas las matrices ambientales y en diversos elementos. El CO<sub>2</sub> atmosférico es incorporado a los procesos metabólicos de las plantas mediante la fotosíntesis. Este CO<sub>2</sub> participa en la composición de todas las estructuras necesarias para que el árbol pueda desarrollarse; producto de esto es posible encontrarlo en todos los productos de origen forestal, donde puede quedar almacenado por años. Fuente: (Ordoñez, 1999).



### 4.3.3. Desbalance de los niveles de carbono en las matrices ambientales

Al circular a través de las matrices ambientales en forma continua, los niveles de carbono en forma natural están en equilibrio con las condiciones ambientales existente en la biosfera. El CO<sub>2</sub>, no solo sirve como fuente natural de carbono, sino que además cumple un rol importante otorgando las condiciones térmicas adecuadas para el sustento de la vida en el planeta, sin embargo, basta el más leve desbalance para alterar profundamente la estabilidad de los ecosistemas terrestres. Esto último se refleja en el hecho que solo el 9,4 % de las emisiones de CO<sub>2</sub> son de origen antrópico (Córdova, et al, 2010).



**Figura 4.15. Niveles de aumento en los niveles de CO<sub>2</sub> hasta fines del siglo XX.** La concentración atmosférica de CO<sub>2</sub> ha aumentado en más de un 15 % desde finales de la década de 1950. La forma de dientes de sierra de la gráfica se debe a las variaciones estacionales regulares de la concentración de CO<sub>2</sub> a lo largo de cada año. Fuente: Brown, et al, 2004.

En los últimos años se ha incrementado el CO<sub>2</sub> atmosférico producto de las actividades antrópicas, principalmente de la quema de combustibles fósiles, la tala de bosques y el desgaste del humus del suelo. Esto ha generado que los niveles actuales de CO<sub>2</sub> son los más elevados los últimos 650.000 años (IPCC, 2005).

Puesto que la masa de carbono que contiene el planeta es prácticamente constante, el aumento debe provenir de otro depósito de almacenamiento. La reserva de carbono a fines del siglo XX se estimaba en alrededor de 760 Gt en comparación con 610 Gt en 1860, lo que significa un incremento de 24,5 % en 140 años (Henry, et al, 1999). Se cuentan tres transferencias netas:

- a) Una adición aproximada a la atmósfera de 5 Gt/año debida a la quema de combustibles fósiles; la existencia de estos en la corteza terrestre es de más de 5,000 Gt.

- b) Una adición a la atmosfera más o menos de 0 a 2 Gt/año de carbono proveniente de la oxidación de tejidos vegetales, basura y carbono del suelo, debida principalmente a la tala de bosques. La existencia total de cada una se supone en 590 Gt de biomasa viva, 60 Gt de basura y 1,670 Gt de humus de suelo. Se estima que en la fotosíntesis y la transferencia por transpiración son iguales a 63 Gt/año
- c) Una transferencia neta de la atmosfera a los océanos de 4 Gt/año de carbono (la diferencia muy grandes en ambos sentidos) (Henry, et al, 1999).

#### 4.4. DISCUSION

##### Aspectos generales de las cuencas hidrográficas

En Chile, el concepto de cuenca es bastante antiguo desde el punto de vista académico, pero, bastante reciente desde el punto de vista de la toma de decisiones y de políticas ambientales; y en este último aspecto, con connotaciones muy diferentes a las planteadas por la bibliografía internacional. La política ambiental de cuencas en Chile fue implementada en enero de 2010 a través de la CONAMA y consideró solo el concepto productivista en base al recurso agua, omitiendo la gran mayoría de los aspectos sistémicos citados en este capítulo. Esto ha hecho que la división basada en regiones hidrográficas solo sea de interés académico y no un elemento base a la hora de definir políticas de ordenamiento territorial en Chile

Sin embargo, a nivel internacional, el concepto cuenca considera aspectos como:

- Cultura
- Producción de agua no solo para riego sino también para la generación de energía
- Generación de bienes y servicios
- Producción de alimentos
- Unidad territorial
- Hábitat
- Paisaje y recreación
- Biodiversidad

La política nacional de cuencas y la legislación actual (en su redacción oficial) omitieron estos aspectos centrándose en la producción del recurso hídrico como eje central y no en los aspectos holísticos y sistémicos que se manejan actualmente del concepto cuenca hidrográfica, ya que, (para la legislación chilena) cuenca parece ser sinónimo de agua, sin embargo, Dourojeanni (2010) plantea que una cuenca puede tener dicha denominación y no necesariamente tener agua.

La cuenca como concepto puede tener diferentes definiciones basadas en los perfiles de los aspectos bajo los cuales se interviene esta unidad y, aunque la definición de cuenca toma como base el orden natural considerando la línea divisoria de las aguas, esta división no siempre concuerda con los límites que sectorizan políticamente el país. Esto no resulta difícil de entender debido a la fuerte tendencia histórica que el país ha tenido al respecto. La colonización europea en Chile [a partir del siglo XVI] se dio de norte a sur, por lo que los primeros asentamientos hispánicos en el país fueron en las mediaciones de los grandes ríos que abastecieron de agua a las nacientes ciudades chilenas. En la costa

los asentamientos se produjeron en las desembocaduras de los ríos<sup>48</sup> y en el interior (en las zonas de secano), a orillas de los ríos interiores<sup>49</sup> en los valles transversales. Esto hizo que históricamente en Chile se acentuara la cultura de valle y no de cuenca, por lo que la división político administrativa de Chile se ampara en este concepto y no en el de cuenca, por lo que idear una subdivisión bajo este orden está en contra del paradigma que ha imperado en el país desde sus inicios. Esto último se ejemplifica en el hecho que la clasificación de cuencas en base a la posición relativa en la cuenca fluvial –que determina la tipología de cuenca alta (o captación), media y baja– permite determinar ciertos impactos que producidos en la parte baja se generan producto de alteraciones (la mayoría antrópicas) en la zona de captación. Muchas ciudades en Chile que se localizan en las zonas bajas tienen impactos por las alteraciones que se producen en las zonas altas, los cuales muchas veces están en los estándares que exige la ley, pero la inexistencia de una norma de cuencas hace que legalmente los daños producidos en las zonas bajas no son atribuibles ante la ley de los daños ocasionados en las zonas altas. Un ejemplo de esto lo constituye el hecho que los acontecimientos ocurridos en la zona de captación de la cuenca del río Maipo que se encuentran en la comuna de Lo Barnechea afectan seriamente a la comuna de San Antonio, distante más de 200 km de distancia, la cual, se encuentra en la zona baja de esta cuenca

Este tipo de fenómenos (entre otros) son muy comunes en Chile debido a las características del territorio nacional. Chile presenta una longitud de 4270 km con rasgos fisiográficos que distinguen un abrupto gradiente altitudinal Oeste-Este. La configuración fisiográfica del territorio (constituido entre la Cordillera de Los Andes y de la costa, con desniveles que superan los 5 mil metros en no más de 200 km) determina la presencia de 129 cuencas hidrográficas (las subcuencas que las conforman están definidas y debidamente numeradas por la DGA) y los problemas mencionados anteriormente, se repiten en todo el territorio nacional<sup>50</sup>. Los problemas ambientales han tenido un alto impacto en el país, considerando que solo el 37 % de las cuencas en Chile son de clase A.

A pesar que el concepto holístico de cuenca hidrográfica permite una visión sistémica de los procesos que en ella ocurren, los problemas ambientales en Chile se solucionan con paradigmas reduccionistas. Con un enfoque opuesto tendrían una solución basada en las sinergias que se producen en las cuencas con la posibilidad cierta de llevar a cabo una solución más integradora. Sin embargo, los aspectos relativos a la solución de problemas ambientales tienen diferentes acepciones no habiendo una visión única de las intervenciones que pueden efectuarse en las cuencas; Trivelli (2006) plantea solo 3 aspectos de intervención (restauración, rehabilitación y recuperación), mientras que Gómez (2004) plantea 6 aspectos de intervención (restauración, restitución, rehabilitación,

---

<sup>48</sup> De esta forma nacieron ciudades como Concepción a la orilla del río Bio Bio, Valdivia a orillas de río Calle Calle y Valparaíso a orillas del estero las Delicias, entre otras.

<sup>49</sup> Ciudades como San Felipe, Casablanca, Rancagua o Santiago se asentaron en valles interiores en los márgenes de ríos para su abastecimiento permanente. Este tipo de ciudades fueron las que más desarrollo tuvieron durante la colonia debido a la prohibición de la Corona española de fundar grandes ciudades costeras debido al ataque de corsarios holandeses e ingleses.

<sup>50</sup> En Valparaíso, la acumulación de sedimentos crea muchos problemas en las labores portuarias debido a la sedimentación de los cauces que tributan hacia el mar, por lo que los sitios portuarios deben ser permanentemente dragados. En otras ciudades como San Antonio en la zona centro y Puerto Chacabuco en la zona sur del país el problema tiene características similares.

reforma, revegetación y sustitución), sin embargo, ningún autor plantea si los procesos de intervención están en función del estado inicial de las cuencas antes de la intervención humana o en función del estado adaptativo al cual evolucionó la cuenca posterior a la intervención humana, el cual, es considerado natural, ya sea, porque la cuenca ha logrado mitigar los procesos erosivos o porque la intervención fue realizada hace muchos años. Por ejemplo, *Acacia cavens* tenía una distribución natural desde la cuenca del río Copiapó hasta la cuenca del Cachapoal, sin embargo, su distribución actual es hasta la cuenca del Bío Bío<sup>51</sup>.

Ambos autores no plantean si las cuencas deben ser intervenidas a su estado anterior a su estado primitivo. Considerando lo anterior, los procesos adaptativos que siguen a la restauración de cuencas deben contemplar la biocenosis y el biotopo del ecosistema para que los elementos propios de la intervención, logren las interdependencias necesarias para restablecer (en la medida de lo posible) las redes sinérgicas propias del ecosistema antes de los procesos de deforestación y erosión. Es por esto que elementos como el clima, zona de la cuenca (alta, media o baja), tipo de suelo, etc.... son tan importantes como las especies vegetales o las obras de restauración hidrológico – forestal.

### **Aspectos conceptuales del suelo**

Ciertos aspectos en torno al suelo no están aunados, y por tanto no establecen criterios únicos en materia como definición o clasificación. Estas últimas se efectúan según criterios funcionales basados en parámetros seguidos por el investigador según su estudio específico (Peralta, 1976), el cual, puede diferir de otros estudios cuyos criterios estén estipulados bajo parámetros absolutamente distintos (económicos, académicos, etc...). Por ejemplo, la 7ª aproximación establece 10 clases de suelos para Chile; el estudio del Ciren determina aspectos generales y no considera variaciones menores (por ejemplo, fluctuaciones en una distancia de 100 metros), ya que, determina las características para una amplia zona que puede abarcar ciento de hectáreas.

Los estudios consideran clasificaciones generales, estableciendo diferencias entre un suelo y otro que no pueden cuantificarse como exactas, ya que, no puede efectuarse un análisis de muchos pedones – por ejemplo cada 10 metros – en un estudio que abarque cientos de hectáreas. Autores como Cortés (2007) plantean que suelo en un continuo, por lo tanto, no se puede hacer una sectorización tácita y cuestiona la exactitud de los mapas de suelos.

En materia de estructura y funcionalidad de suelos, muchos autores replantean ciertas características, ya sea para enriquecer el marco teórico respectivo o para la funcionalidad propia de sus propias investigaciones; Peralta (1976) plantea la existencia de 4 horizontes, mientras que Cortés (2007) propone 7 horizontes con su respectiva clasificación, en otros aspectos, difieren en áreas como la clasificación o sectorización, pero coinciden en el aspecto conceptual. Esto significa que a pesar de las diferencias, no existe una polisemia en cuanto a las características del suelo descritas por estos dos autores. Estas características constituyen parámetros eficientes los cuales pueden ser cuantificados permitiendo establecer clasificaciones y usos. La textura, pedregocidad,

---

<sup>51</sup> En caso de desconocerse este aspecto histórico, un plan de restauración de *Acacia cavens* podría considerar como distribución natural hasta la cuenca del Bío Bío. En aspectos faunísticos ocurren casos similares, por ejemplo, la distribución de huemules en Chile abarcaba desde los nevados de Chillán hasta la Patagonia, sin embargo, su distribución actual esta segmentada y ningún plan de conservación contempla redistribuir los ejemplares a zonas que ocuparon primitivamente.

estructura, pH, pendiente, etc... constituyen características primordiales y básicas para llevar a cabo un análisis de suelos y constituyen la base del marco conceptual en estudios edáficos. Estos parámetros se definen claramente en este capítulo, siendo la base para el desarrollo de los objetivos respectivos. A esto se suma la determinación del componente microbiano del suelo, el cual, funciona como caja negra, ya que, aun falta por determinar la estructura de muchas funciones metabólicas de las colonias microbianas del suelo<sup>52</sup>, aunque, han sido ampliamente estudiadas para el desarrollo de actividades como el rendimiento agrícola y biorremediación.

Como parte fundamental del suelo, el componente biótico ha permitido su aplicación en muchos ámbitos, debido a la diversidad de procesos metabólicos que la flora microbiana lleva a cabo en el medio ambiente, estableciéndose incluso una nueva disciplina denominada “microbiología ambiental”, la cual, estudia activamente procesos como los ciclos biogeoquímicos que constituyen la base del flujo de materia en la biósfera. En el caso de la reforestación y restauración de suelos, la restitución de poblaciones microbianas es un parámetro clave para establecer funciones como por ejemplo, la degradación de materia orgánica.

Finalmente, el objetivo último está basado en la captura de carbono. La importancia radica en que es necesario determinar los aspectos básicos de uno de los problemas medioambientales que más urgencia tiene a nivel mundial. El protocolo de Kyoto estableció los lineamientos básicos que los países firmantes debían seguir para reducir la emisión de los gases invernadero debido a su actividad industrial. Aunque en la actualidad EE.UU y China son los países que más generan estos gases; los países en vías de desarrollo no pueden estar ajenos a esta realidad. La restauración de cuencas constituye una poderosa herramienta para maximizar la captura de carbono a través de la reforestación.

---

<sup>52</sup> Por ejemplo, algunas cepas microbianas no crecen en cultivos en laboratorio.

#### 4.5. BIBLIOGRAFIA ESPECÍFICA

ABRAHAMSON, D; Dougherty, P; Zarnoch, S. Hydrological components of a young loblolly pine plantation on a sandy soil with estimates of water use and loss. *Water Resources Research*. 34(12): 3.503-3.513. 1998

AGUIRRE, Margarita. Atlas universal Antártica Chile y sus regiones. 16ª edición, Santiago de Chile. Editorial Antártica. 2009, 115 págs.

ALEXANDER, M.. Introduction into soil microbiology. John Wiley & Sons. New York. 1977

ALMIZRY, P. Redistribución de las precipitaciones en plantaciones de *Pinus radiata* D. con diferentes edades y manejo en la zona de Collipulli, IX Región. Tesis (IngENIERO Forestal). Valdivia, Chile. Universidad Austral de Chile, Facultad de ciencias forestales, 1997. 87 págs.

AMANN, R. I, W. Ludwig y K. H. Schleifer.. Phylogenetic Identification and In Situ Detection of Individual Microbial Cells without Cultivation. *Microb. Rev.* 59: 143-169. 1995

AÑÓ, Carlos; Sánchez, Juan; Antolín, Carmen y Goberna, Marta. Capacidad y vulnerabilidad de los suelos de la comunidad valenciana, en: revista *Investigaciones Geográficas*, 28: 105-123. 2002.

APPS, M; Kurz, W; Luxmoore, R; Nilsson, L; Sedjo, R; Schmidt, R; Simpson, L and Vinson, T. Boreal Forests and Tundra. In Wisniewski, J. y R.N. Sampson (Eds). *Terrestrial Biospheric Carbon Fluxes: Quantification and Sources of CO<sub>2</sub>*. Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 39-53. 1993.

ASSIH, E. A., A. S. Ouattara, S. Thierry, J.-L. Cayhol, M. Labat, and H. Macarie.. *Stenotrophomonas acidaminiphila* sp. nov., a strictly aerobic bacterium isolated from an upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor. *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.* 52:559-568. 2002

ATLAS, R. M. y R. Bartha.. *Microbial Ecology, fundamentals and applications*. The Benjamin/Cummings Publishing Company. Redwood City, CA. 1997

AXELROOD, P. E., M.L. Chow, C.C. radomski, J.M. Mc Dermott, and J. Davies.. Molecular characterization of bacterial diversity from British Columbia forest soils subjected to disturbance. *Can, J. Microbiol.* 48:655-674. 2002

BAATH, E.. Growth rates of bacterial communities in soils at varying pH: a comparison of the thymidine and leucine incorporation techniques. *Microb. Ecol.* 36:316-327. 1998

BREEDVEID, G.D. y Sparrevik, M. Nutrient limited biodegradation of PAH in various soil strata at a creosote contaminated site. *Biodegradation*. 11: 391 – 399. 2001

BROWN, S; Hall, C; Knabe, W; Raich, J; Trexler, M and Woormer, P. Tropical Forest: their Past, Present and Potential Future Role In The Terrestrial Carbon Budget. *Water, Air and Soil Pollution*, 70: 71 – 94. 1993.

BROWN, Theodore; LeMay, Eugene; Bursten, Bruce and Burdge, Julia. Química, La Ciencia Central. 9ª edición, México D.F. Editorial Prentice Hall Hispanoamericana, 2004, 1046 págs.

CALDER, I. Water use by forests, limits and controls. *Tree Physiology*. 18: 625-631. 1998

CANTU, I; González, H. Propiedades hidrológicas del dosel de los bosques de pino - encino en el noreste de México. *Ciencia UANL*. 5(1): 72-77. 2002

CARAVACA, F., Lax, A and Albaladejo, J. Soil aggregate stability and organic matter in clay and fine silt fractions in urban refuse-amended semiarid soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 1235-1238. 2001.

CHIAPPA, Elizabeth; Villaseñor, Rodrigo. *Ecología*. 1ª edición, Valparaíso, Chile, Editado por la Universidad de Playa Ancha de Ciencias de la Educación, 2002, 116 págs.

CHOW, Ven Te; Maidment, David and Mays, Larry. *Hidrología aplicada*. 1ª edición, Bogotá, Colombia. Editorial Mc Graw Hill. 1994, 300 págs.

CORTES, Amparo. *Los suelos contaminados y su gestión*. Barcelona, España. Editado por el Departamento de productos naturales, Biología vegetal y edafología. Universidad de Barcelona. 2007. 184 págs.

COTLER, Helena; Priego, Ángel, Rodríguez, Claudia y Enríquez, Carlos. Determinación de zonas prioritarias para la eco-rehabilitación de la cuenca Lerma-Chapala, en: revista: *Gaceta ecológica, Instituto nacional de ecología*. Nº 71: 79-92. 2004

CORDOBA, P; Meléndez, I; Navarro-Pedreno, J; Almendro, M y Mataix, J. Dinámica de materia orgánica en el Parque Natural El Hondo de Elche-Crevillente (España). *Rev. de Ciencias Agrarias*. 33(1): 163-170. 2010

CROCKFORD, R.; Richardson, D. Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: effect of forest type, ground cover and climate. *Hydrological Processes* 14: 2903-2920. 2000.

CURTIS, T.P., W.T. Sloan, and J. W. Scannell.. Estimating prokaryotic diversity and its limits. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 99:10494-10499. 2002

DE SIMON, Estanislao y De Simón, José Antonio. Restauración de la cubierta vegetal en zonas semiáridas. En: Curso internacional de restauración hidrológica forestal, control de la erosión y defensa contra la desertización (5º, 1998, Madrid, España). Documentación. Madrid, España. Ministerio del Medio Ambiente, Dirección general de conservación de la naturaleza, 1998, pp. 1 – 27.

DIXON, R; Sathaye, J; Meyers, S; Masera, O; Makarov, A; Toure, S; Makundi, W and Wiew, S. Greenhouse Gas Mitigation Strategies: Preliminary Results from the U.s. Country Studies. *Program. Ambio*, 25 (1): 26-32. 1996.

DONOSO, C. *Ecología Forestal. El Bosque y su Medio Ambiente. Importancia y Uso de los Suelos en el Manejo Forestal*. Cuarta Edición. Santiago, Chile. Editorial Universitaria. 1994, 369 págs.

DOTT, W; Feidieker, D; Steiof, M; Becker P & Ktimpfera, P.. Comparision of ex – situ and in – situ techniques for bioremediation of hydrocarbon – polluted soils. *Int. Biodet. Biodegradation*. 301 – 306. 1995

DOUROJEANNI, Axel. “El contexto de gestión integrada de recursos hídricos por cuencas”. En: Curso Internacional Conaf – Jica “Gestión integrada de cuencas hidrográficas con énfasis en desarrollo sustentable de territorios rurales y medioambiente” (10º, 2011, Santiago de Chile). Santiago de Chile, Fundación Chile, 2010, 64 págs.

EASTHAM, J; Rose, C; Charles-Edwards, D; Cameron, D and Rance, S. Planting density effects on water use efficiency of trees and pasture in an agroforestry experiment. *New Zealand Journal of Forestry Science*. 20(1): 39-53. 1990.

EDWARD, J. La ciencia del suelo y su manejo. Paraninfo Editores. Madrid, España. 2000.

ETTEMA, C. H. y Wardle, D. A. Spatial soil ecology. *Trends Ecol. Evol.* 17: 177-183. 2002

FRANCKE, Samuel; Vargas, R; Williams, E; Pinto, M y Yoma, R.. *Recuperación de Suelos Degradados en el Marco del DL – 701 de Fomento Forestal*. 2ª edición. Santiago de Chile. Editado por Corporación Nacional Forestal (CONAF). Programa de Manejo de Cuencas Hidrográficas y Conservación de Suelos. 2004. 96 Págs.

FRANCKE, Samuel; Yoma, Ricardo; Carnieletto, Celso; Rivera, Hugo y Nakagawa, Mamoru. Informe técnico de la contribución de conaf a la estrategia nacional de cuencas, editado por CONAF. Santiago de Chile. 2008, 72 pags.

GALVEZ, *Juventino*. “La restauración ecológica: conceptos y aplicaciones”. Universidad Rafael Landívar. Facultad de ciencias ambientales y agrícolas. Instituto de agricultura, recursos naturales y ambiente. Serie de documentos técnicos Nº 8. 2002. 23 pags.

GOMEZ, Domingo. “Recuperación de espacios degradados”. Ediciones Mundi – Prensa. Madrid, España. 1ª edición. 2004. 584 Págs.

GOMEZ, Rene; Miñano, José; Cabrera Guillermo; Urizar, Alfredo; “Análisis uso actual y futuro de los recursos hídricos de Chile”, Centro de información de recursos hídricos, Dirección general de aguas, Ministerio de obras públicas. Santiago de Chile, 1996, 167 págs.

GRIFFITHS, R.I., A.S. Whiteley, A.G. O’Donnell, and M.J.Bailey.. Rapid method for coextraction of DNA and RNA from natural environments for analysis of ribosomal DNA- and rRNA-based microbial community composition. *Appl. Environ. Microbiol.* 66:5488-5491. 2000

GUERRERO, J.L; Giménez, J.J and Torija, M. Mineral nutrient composition of edible wild plants. *Journal of food composition and analysis*. Vol 11 (4): 322 – 328. 1998.

HASTINGS,R.C., C. Butler, I.Singleton, J.R. Saunders, and A.J. McCarthy.. Analysis of ammonia-oxidizing bacteria populations in acid forest soil during conditions of moisture limitation. *Lett. Appl. Microbiol.* 30:14-18. 2000



HENRY, Glynn y Heinke, Gary. *Ingeniería ambiental*. 2ª edición, México, Editorial Prentice Hall Hispanoamericana, 1999, 778 pags.

HOOVER, M. La acción y el movimiento del agua en el bosque. *In: FAO. La influencia de los montes*. Roma, Italia. 33-88, 1962.

HOT, R. Intercepción de lluvia por una plantación de *Pseudotsuga menziesii* y un bosque nativo del tipo Roble Raulí Coigüe en la Reserva Forestal Malalcahuello, IX Región. Tesis (Ingeniero Forestal). Valdivia, Chile. Universidad Austral de Chile, Facultad de ciencias forestales. 1998. 108 pags.

HUBER, A.; Iroumé, A. Variability of annual rainfall partitioning for different sites and forest covers in Chile. *Journal of Hydrology*. 248: 78-92. 2001

HUBER, Anton; Iroumé, Andrés; Mohrc, Cristian y Frêne, Cristian. Efecto de plantaciones de *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus* sobre el recurso agua en la Cordillera de la Costa de la región del Biobío, Chile. En: revista Bosques 31(3): 219 – 230, 2010

HUBER, A y Trecaman, R. Eficiencia del uso del agua en plantaciones de *Pinus radiata* en Chile. *Bosque*. 25(3): 33-43, 2004.

IBARRA, Daniel; Ruiz, José; Flores, José y González, Diego. Distribución espacial del contenido de materia orgánica de los suelos agrícolas de Zapopan, Jalisco. En: revista *Terra Latinoamericana*. 25 (2): 187-194. 2007.

INE Instituto Nacional de Estadísticas, 2005. Medio Ambiente Informe Anual. Editado por el Instituto nacional de estadísticas. Santiago de Chile. Nº 19, 322 Págs.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2005*. The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment. Cambridge University Press, Cambridge. 1995

KÄSTNER, M. Humification: process or formation of refractory soil organic matter. En J. Klein (Ed), *Biotechnology. Environmental processes II. Soil decontamination*. Wiley-VCH. Weinheim. pp. 89-126. 2000.

KIRKBY, M. y Morgan, R. *Erosión de suelos*. México, D. F. Limusa, editores. 1984, 200 págs.

LADD, J. N., R. C. Foster, P. Nannipieri y J. M. Oades.. Soil structure and biological activity. *Soil Biochem*. 9:23-78. 1996

LEE, R. *Forest Hydrology*. Columbia University Press, New York (USA). 1980, 349 pags.

LEE, Y.A., and C.C. Wang.. The design of specific primers for the detection of *Ralstonia solanacearum* in soil samples by polymerase chain reaction. *Bor. Bull. Acad. Sin*. 41:121-128. 2000

LEON, Gustavo y Pérez, Federico. Nota crítica: aspectos básicos del enfoque global para el manejo de los recursos hídricos por cuencas hidrográficas. En: revista *Región y sociedad*, Colegio de Sonora. 9(16): 133 – 151. 1998.

MCCAIG, A. E., S.J. Grayston, J.I. prosser, and L.A. Glover.. Impact of cultivation on characterization of species composition of soil bacterial communities. *FEMS Microbiol. Ecol.* 35:37-48. 2001

MARGESIN, R & Schinner, F. Laboratory bioremediation experiments with soil from a diesel–oil contaminated site significant role of cold adapted microorganisms and fertilizers. *Journal chemistry technology and biotechnology.* 70: 92 – 98. 1997

MARTINEZ DE AZAGRA, Andrés y Navarro, Joaquin. *Hidrología forestal*. 3ª edición, Valladolid, España. Editado por la Universidad de Valladolid, 1996, 286 págs.

MARTINEZ, V; López, F. Efecto de los hidrocarburos en las propiedades físicas y químicas de los suelos arcillosos. *Revista Instituto mexicano del petróleo.* 19: 9 – 17. 2001

MENN, F; Easter, J & Sayler, G.. Bacterial activity enhancement and soil decontamination. *Biotechnology.* 425 – 439. 2000

MOHAMED, A; Farid, B; Acderrazag, Z; Chaala, O & Abdelmohsen, O.. Bioagumentation and biostimulation Studies in the bioremediation of crude oil contaminated UAE soils. *College of engineering.* 70: 214 – 219. 2002

MORGAN, R. P. C. Soil erosion in the United Kingdom. *Cranfield Institute of Technology. Occasional Paper 4.* Cranfield, United Kindomg. 1977

MOVILLON, M; Richards, B y Tumawis, H. . What happens on earth in one minute? En: *E.M. Bridges*, Editado por: I.D. Hannam, L.R. Oldeman., F.W.T Penning de Vries, S.J. Scherr, y S. Sombatpanit. *Response to Land Degradation.* Science Publishers Inc., Enfield, NH, EE.UU. 2001.

NAVARRO B, Navarro G. *Química agrícola. El suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal.* MundiPrensa. Madrid, España. 2000

NIEMEYER, H y Cereceda, Pilar. “*Geografía de Chile, Hidrografía*”. Editado por el Instituto geográfico militar, Tomo VIII. Santiago de Chile, 1984

NOGALES, Braulio. La microbiología del suelo en la era de la biología molecular: descubriendo la punta del iceberg, en: revista *Ecosistemas*, 14 (2): 41-51. 2005.

NUNAN, N., Wu, K., Young, I. M., Crawford, J. W. y Ritz, K.. Spatial distribution of bacterial communities and their relationships with the micro-structure of soil. *FEMS Microbiol. Ecol.* 44: 203-215. 2003

OLDEMAN, L. The global extent of land degradation. En: *Land Resilience and Sustainable Land Use* D.J. Greenland e I. Szabolcs (eds.). 20: 99-118. 1994

ORDOÑEZ, José. *Captura de carbono en un bosque templado: El caso de San Juan Nuevo, Michoacán*. 1ª edición, México. Editado por el Instituto Nacional de Ecología-Semarnap, 1999, 74 págs.

PARRA, Oscar. *Gestión integrada de cuencas hidrográficas*. Documento introductorio, editado por el Centro de Ciencias Ambientales, EULA-Chile Universidad de Concepción, Concepción, Chile. 2009, 15 págs.

PERALTA, Mario. *Uso, clasificación, y conservación de suelos*. 1ª edición, editado por el Servicio agrícola y ganadero (SAG), Ministerio de agricultura, Santiago de Chile. 1976, 340 págs.

SESSITSCH, A., A. Weilharter, M. H. Gerzabek, H. Kirchmann y E. Kandeler.. Microbial population structures in soil particle size fractions of a long-term fertilizer field experiment. *Appl. Env. Microbiol.* 67: 4215-4224. 2001

SORKOH, N; Ibrahim, A; Ghannoum, M & Radwan, S.. High temperature hydrocarbon degradation by a bacillus *stearothermophilus* from oil polluted Kuwait desert. *Applied Microbiology and Biotechnology.* 39: 123 – 126. 1993

SPIRO, Thomas and Stigliani, William. *Química Medioambiental*. 2ª edición, Madrid, España. Editorial Pearson Prentice Hall Hispanoamericana, 2004, 520 págs.

TORRES, Benítez; Cortes, Elizabeth; Mejía, José; Sáenz, Enrique; García, Exebio; Santos, Adolfo; Hernández, Ana Laura y Delgadillo, María. Evaluación de la degradación de los suelos en la cuenca "El Josefino", en: revista *TERRA Latinoamericana*, 21 (1): 117-126. 2003.

TRIVELLI, Cristian. Evaluación de la aplicación de técnicas de restauración hidrológica forestal y ambiental en procesos de erosión de cárcavas. Tesis (Ingeniero forestal). Santiago, Chile. Universidad Mayor, Facultad de ciencias forestales, 2006. 156 pags.

VAN DER WOLF, J. M., S. G. C. Vriend, P. Kastelein, E. H. Nijhuis, P.J.Van Berkkum, and J.W.L. Van Vuurde.. Immunofluorescence colony-staining (IFC) for detection and quantification of *Ralstonia (Pseudomonas) solanaceum* biovar 2 (race 3) in soil and verification of positive results by PCR and dilution plating. *Eur. J. Plant. Pathol.* 106:123-133. 2000

VASQUEZ, Carlos; Batis, Ana; Alcocer, Ana; Gual, Marta y Sánchez, Cristina. Árboles y arbustos nativos potencialmente valiosos para la restauración ecológica y la reforestación Instituto de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México. México D. F., México. Proyecto J-084 – Conabio. 1999. 15 págs.

VELA-CORREA, Gilberto y Flores, David. Génesis de suelos del Parque Nacional "El Tepeyac", en: revista *Terra Latinoamericana*, 22(4): 389-399. 2004.

VIÑAS, Marc. Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos: caracterización microbiológica, química y ecotoxicológica. Tesis (Dr. Microbiología Ambiental y Biotecnología). España. Facultad de Biología Universidad de Barcelona. 2005. 352 Págs.

WHITELEY, A.S., R.I. Griffiths, and M.J. bailey.. Analysis of the microbial fuctional diversity within water stressed soil communities by flow cytometric analysis and CTC+cell sorting. *J. Microbiol. Methods* 54:257-267. 2003

WHYTE, L. G., L. Bourbonniere y C. Bellrose, C. Bioremediation assessment of hydrocarbon-contaminated soils from the high arctic. *Can. Biorem. J.* 3:69-79. 1999

ZENG, N.; Shuttleworth, J.; Gash, J. Influence of temporal variability of rainfall on interception loss. Part I. Point analysis. *Journal of Hydrology.* 228: 228-241. 2000

ZINCK, Alfred. Suelos, información y sociedad. En: revista *Gaceta Ecológica*, N° 76: 7-22. 2005.

### **Web**

ARTIEDA, Cabello. *Génesis y distribución de suelos en un medio semiárido*. [en línea]. Zaragoza, España. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. 2004. [Fecha de consulta: 5 de febrero de 2010]. Disponible en: <<http://www.geocities.com/RainForest/Andes/4080/genesis.ht>>

Microbiología ambiental y aplicada. 9 de febrero de 2010. [www.Microbiologíaambiental.cl](http://www.Microbiologíaambiental.cl)

RUCKS, L; García, F; Kaplán, A y Ponce de León. Propiedades físicas del suelo [en línea]. Montevideo, Uruguay. Departamento de suelos y aguas, Facultad de agronomía, Universidad de la república. 2004. [fecha de consulta: 5 de febrero de 2010]. Disponible en: <<http://www.fing.edu.uy/ia/departamento%20legal/Apuntes/Capitulo10.pdf>>

---

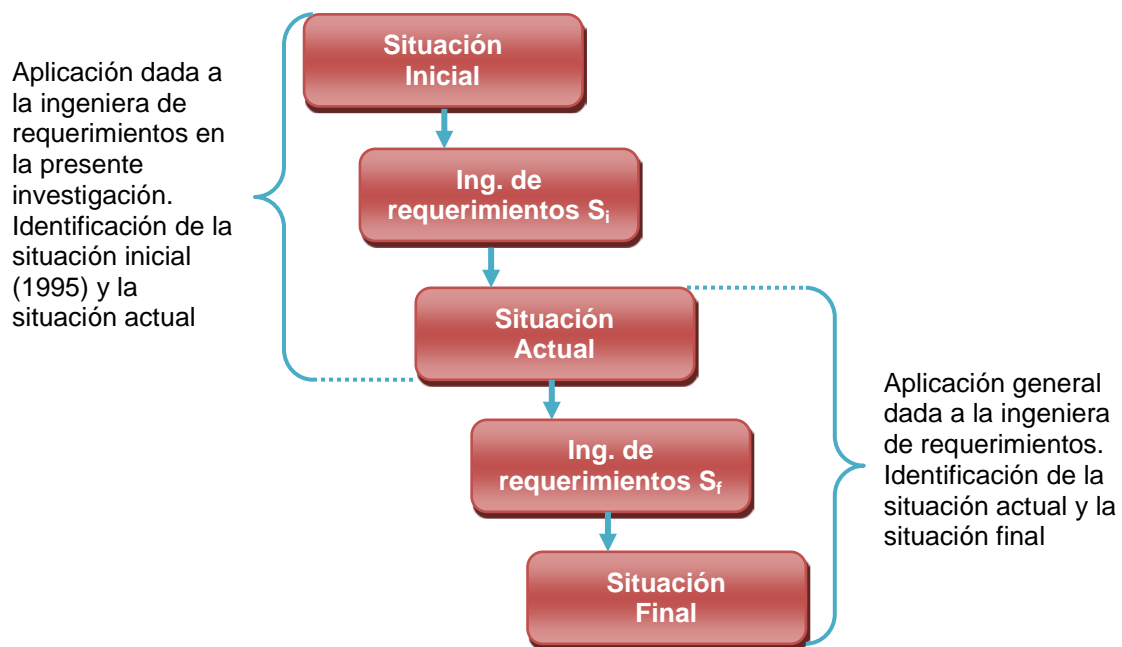
## CAPITULO V

### PROPUESTA METODOLOGICA

---



La investigación está estructurada básicamente con una propuesta metodológica que utiliza herramientas propias de la ingeniería aplicadas a la restauración de cuencas hidrográficas. La metodología central es la ingeniería de requerimientos, lo cual, se define como un "conjunto de actividades en las cuales, utilizando técnicas y herramientas, se analiza un problema y se concluye con la especificación de una solución (Davyt, 2001). "La ingeniería de requerimientos se utiliza para definir todas las actividades involucradas en la identificación de un problema y solución de los requerimientos para el mismo. El uso del término "ingeniería" implica que se deben utilizar técnicas sistemáticas y repetibles para asegurar que los requerimientos del sistema estén completos y sean consistentes y relevantes" (Davyt, 2001)



**Figura 5.1. Aplicación de la ingeniería de requerimientos.** En esta metodología se especifica básicamente lo que se desea a partir de una situación inicial, llegando a una situación final o deseada en tiempo futuro (Ing. requerimientos  $S_f$ ). En la investigación se efectúa una traslación espacial de las situaciones, siendo la situación inicial (Ing. requerimientos  $S_i$ ) no la presente, sino, la inicial al inicio del proyecto (1995) y la final (o futura) se cambia por la actual para el caso de Alto Loica. Esto para analizar los efectos de las obras de restauración hidrológico – forestal en las microcuencas de trabajo. Fuente: Elaboración propia.

Generalmente en la aplicación de esta metodología se comienza por definir la estructura de la situación inicial de la problemática a solucionar (o situación en el tiempo presente), para posteriormente idear una imagen final o deseada a la cual se pretende llegar una vez identificada la problemática y sus requerimientos. Por esto, la situación final (o deseada) está en el tiempo futuro y es a lo que se pretende llegar una vez instaurada y aplicada las técnicas y procedimientos de solución. Sin embargo, en la presente investigación, se comenzará analizando cómo era la situación antes del inicio del proyecto (se considera el año 1990) a lo que se denotará como “situación inicial”, y transcurridos 20 años se analizará que efectos han tenido las obras de restauración en las microcuencas de trabajo en el tiempo presente, a lo que se denominará “situación actual<sup>53</sup>”.

El marco general se estructura en pasos secuenciales y lógicamente determinados, los pasos lógicos son los siguientes:

### **Etapa I. Investigación preliminar**

Incluye aspectos iniciales como la recopilación de la información, donde se comienza a estructurar la base de la investigación con lo cual se establecen los objetivos. A continuación, es necesario conocer cuál es el estado del conocimiento que se tiene respecto al tema, para de esta forma estructurar el Estado del arte de la investigación. Esto último delimitará las fronteras del trabajo estableciendo cuales serán definitivamente los estados de originalidad de la tesis final. Posteriormente, la elaboración del marco teórico otorga las bases conceptuales que sustentan el trabajo. Por último, el establecimiento de una propuesta metodológica concisa y que responda a los requerimientos propios el trabajo donde además, la metodología misma implique un aporte a los estudios de cuencas hidrográficas,

### **Etapa II. Ingeniería de requerimientos**

Se estructura en 4 pasos, los cuales son:

- a) Extracción: principalmente incluye el análisis de la descripción inicial (que para efectos prácticos de denominará “situación preintervención”, haciendo alusión a la situación que tenían las microcuencas antes que se efectuara una labor de restauración –intervención– en ellas) de las microcuencas al inicio del proyecto y el establecimiento del perfil objetivo de la restauración ambiental.
- b) Análisis: implica establecer la problemática y que es lo que se va a solucionar, además de delimitar las posibles soluciones el problema y determinar los criterios de selección de la alternativa correcta utilizada para atacar la problemática. Finalmente se establece el modelo de requerimientos, lo cual, define las especificaciones del problema a solucionar.
- c) Especificación: define el layout estructural en conjunto con los modelos y elementos de restauración, además implica la definición de la implementación de la solución escogida, donde se definen los estándares, aplicación y cálculo de los de dispositivos, estrategias de seguridad y soporte, etc....

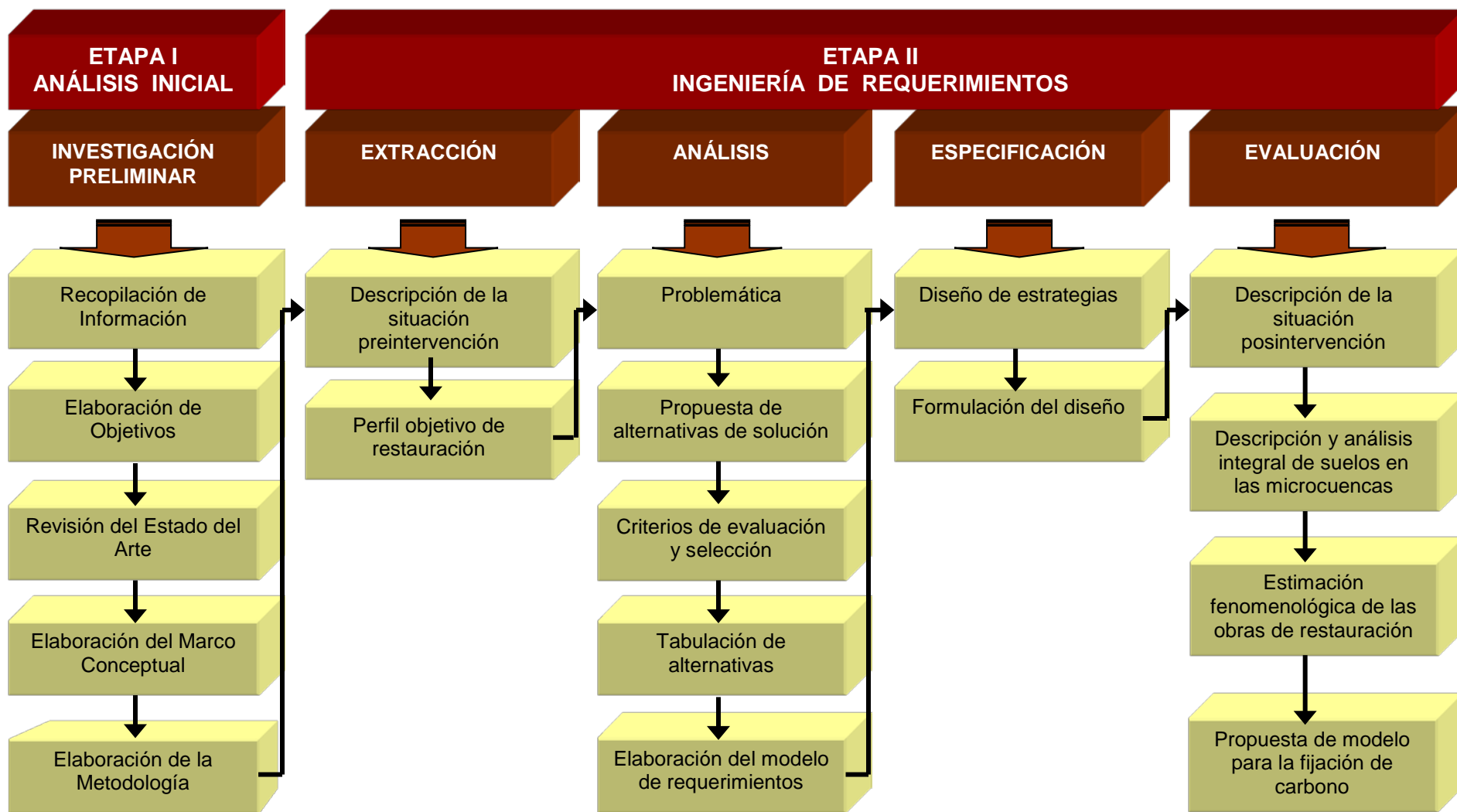
---

<sup>53</sup> Cabe recordar que el termino situación actual para este caso, hace mención a la situación que tenían las microcuencas antes del incendio



d) Evaluación: en este apartado se exponen los resultados de la investigación, lo cual a su vez se estructura en 4 pasos:

- Identificación de la situación actual: se presentan los resultados a más de 15 años de la implementación del modelo. Para efectos prácticos se denominara “situación posintervención”, ya que, se tomarán los antecedentes de restauración de las microcuencas antes del incendio y no la situación netamente actual (después del incendio).
- Descripción y análisis de los suelos de las microcuencas: aquí se efectúan 4 tipos de análisis de suelos: hidrológico, biológico, físico y químico.
- Estimación fenomenológica del modelo de restauración: se describen modelos matemáticos que expliquen y sustenten el proceso de restauración con las zanjas de infiltración implementadas en las microcuencas de Alto Loica.
- Propuesta de modelo para la fijación de carbono: el resultado de la restauración conlleva a la producción de biomasa la cual a su vez implica la fijación de carbono atmosférico, lo cual se cuantificará en este apartado, finalizando con un mecanismo de ajuste de parámetros para determinar la captura de carbono cuando las variables interactuantes cambian sus valores.



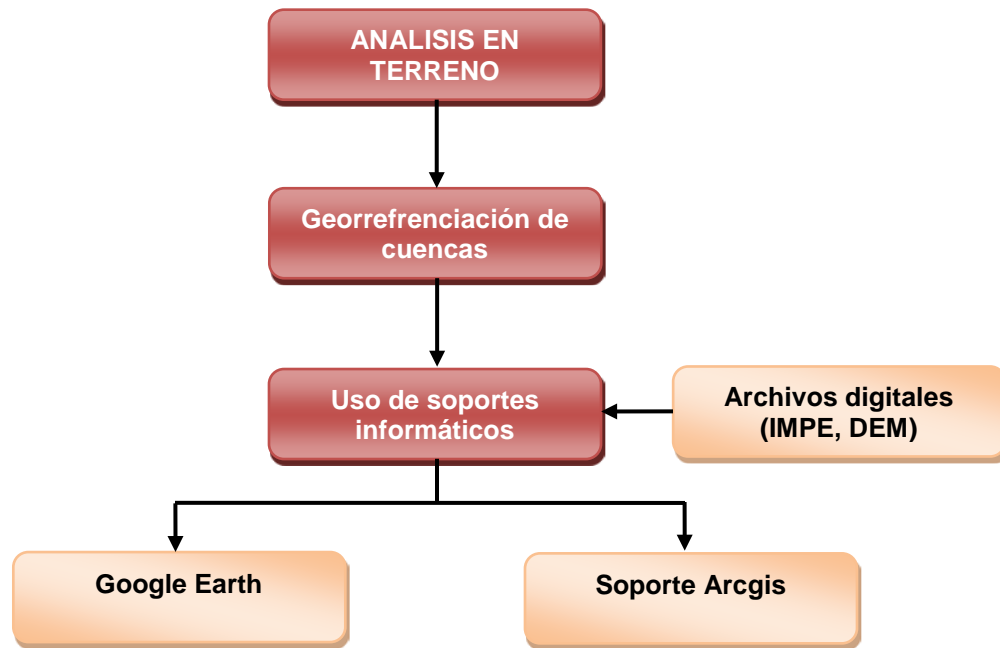
**Figura 5.2. Marco general de la propuesta metodológica.** La investigación se centra en 5 grandes pasos; los cuales, concluyen con la descripción de la situación actual de las microcuencas (considerando la situación de las microcuencas 2 y 3 antes del incendio) y un análisis integral de los suelos de ellas. Esto últimos sirven de base para el modelo de restauración ambiental el que a su vez determinará el potencial futuro de una cuenca para la fijación de carbono. Fuente: Elaboración propia.

## 5.1. EXTRACCION

La extracción está constituida básicamente por dos elementos:

- Descripción de la situación preintervención
- Perfil objetivo de la restauración

Respecto al primer punto, presenta similar metodología a la necesaria para describir la situación posintervención (descrita en detalle en el punto 5.4.1), la cual, se resume de la siguiente forma:



**Figura 5.3. Metodología general para la determinación de la situación posintervención.** El esquema presenta en forma general la metodología a utilizar para determinar la situación que existía en las microcuencas antes de la implementación del proyecto CONAF – JICA (preintervención). Fuente: Elaboración propia.

La implementación de las obras de restauración y la reforestación llevada a cabo en Alto Loica obedeció a fines experimentales (analizar la factibilidad de restaurar zonas degradadas en la zona central de Chile) con el objetivo de efectuar transferencia tecnológica a pequeños y medianos propietarios, además de promover a nivel gubernamental las políticas y acciones necesarias para restaurar suelos erosionados en el país.

Por lo tanto, cuando se implementó el proyecto de restauración en los años 90, no existió un levantamiento digital de información referente al lugar; solo se recolectó información generalizada para el levantamiento de las obras pero no se efectuaron mapas de erosión, mapas de vegetación, erodabilidad del suelo, composición química ni levantamiento morfométrico. La información referente al estado de las microcuencas solo fue topográfica–descriptiva y el análisis de la vegetación fue general basándose en archivos fotográficos que solo son elementos de referencia pero no aportan elementos para levantar información detallada al respecto.

Dado lo anterior y ante la falta de información, la situación preintervención<sup>54</sup> no podía basarse en la información disponible en los datos recolectados durante la implementación del proyecto. Por ello se recurrió a los archivos IMPE<sup>55</sup> de 1990 con el fin de conocer el estado de las microcuencas antes de la implementación del proyecto CONAF – JICA. Estas imágenes se trabajan en conjunto con un modelo de elevación digital (DEM) y la información se digitaliza para ser procesada a los softwares correspondientes (Arcgis).

Posterior a ello, la definición del perfil objetivo se considera como el segundo elemento relevante a definir en este punto. Básicamente, aquí se definen las necesidades, por lo que el perfil objetivo define principalmente “el que” y el “para que” del proyecto.

Respecto a lo primero, el “que” definirá en qué nivel de gestión de cuencas hidrográficas está enmarcado el proyecto y lo segundo establecerá la argumentación que sustente dicho nivel.

## **5.2. ANALISIS**

El análisis plantea una serie de pasos lógicos que definirán que es lo que se a solucionar. El objetivo general da la base para delimitar la pregunta de investigación que conlleva al problema específico (problemática). Una vez definido lo anterior, se especifican cuáles son las alternativas más viables para solucionar la problemática planteada.

La ingeniería de requerimientos plantea que una vez definidas las posibles alternativas, se especifican los criterios de evaluación y selección (Davyt, 2001), los cuales, son básicamente: Técnicos, operativos y funcionales<sup>56</sup>.

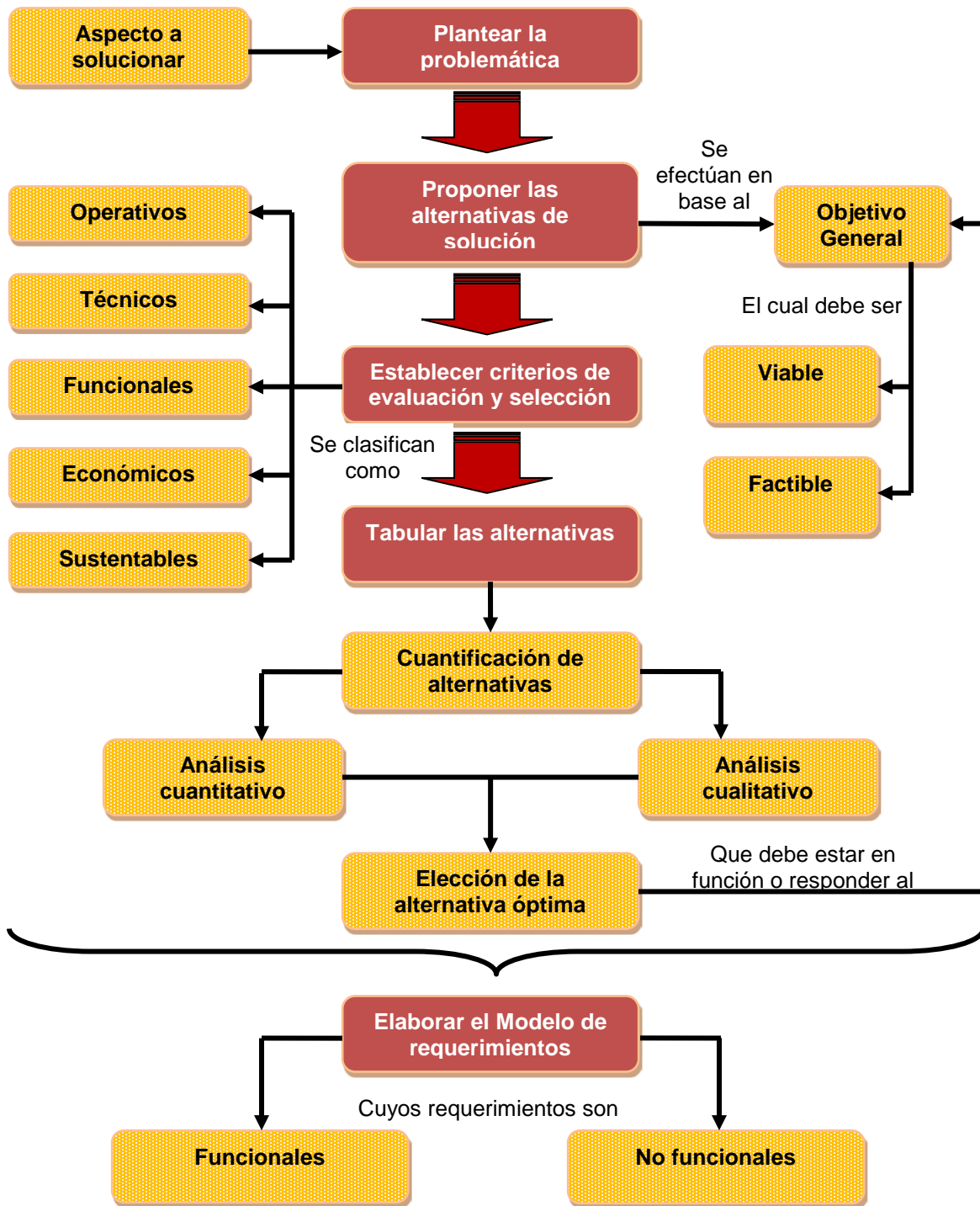
Posterior a ello debe definirse los modelos mediante los cuales se cuantificarán o analizarán las alternativas para definir la alternativa óptima, lo cual, puede establecerse cuantitativamente (estableciendo puntuaciones a cada alternativa si cumplen o no con determinados requerimientos) o cualitativamente (mediante claves). La elección o determinación de la alternativa óptima es el paso previo a la formulación del modelo de requerimientos, en el cual, se cubrirán los aspectos a solucionar, determinando cuales son los requerimientos funcionales y no funcionales (los cuales deben definirse) de la investigación, lo que una vez definidos, darán las directrices a seguir para solucionar el problema de investigación.

---

<sup>54</sup> Se denominó de esta forma al estado en el cual se encontraban las microcuencas (erosión, deforestación, erodabilidad, etc) antes de la implementación del Proyecto CONAF – JICA en los años 90, y por ende, antes que se implementaran las obras de restauración hidrológico – forestales. Por lo tanto, “preintervención” hace alusión a antes que se intervinieran las microcuencas para restaurarlas con reforestación o las obras mecánicas de restauración

<sup>55</sup> Consiste en archivos fotográficos satelitales del Instituto de aeronáutica de Brasil.

<sup>56</sup> Se añadirán a este trabajo los criterios económicos y sustentables debido a que se trabajará en el ámbito de las ciencias ambientales y la solución debe ser amigable con el medio ambiente y no que resulte en un impacto negativo a mediano o largo plazo.



**Figura 5.4. Esquematzación de la metodología de la fase de análisis.** El análisis define específicamente que se va a solucionar y como se hará. Inicialmente se describe que es lo que se va a solucionar, posteriormente se establecen las alternativas de solución más viables y que estén en sintonía con el objetivo general planteado en la investigación. Los criterios de evaluación y selección serán los parámetros que, una vez cuantificados para cada alternativa (en la tabulación de alternativas), definirán cual es la mejor alternativa al problema planteado. Finalmente el modelo de requerimientos define las especificaciones del problema a solucionar. Fuente: Elaboración propia.

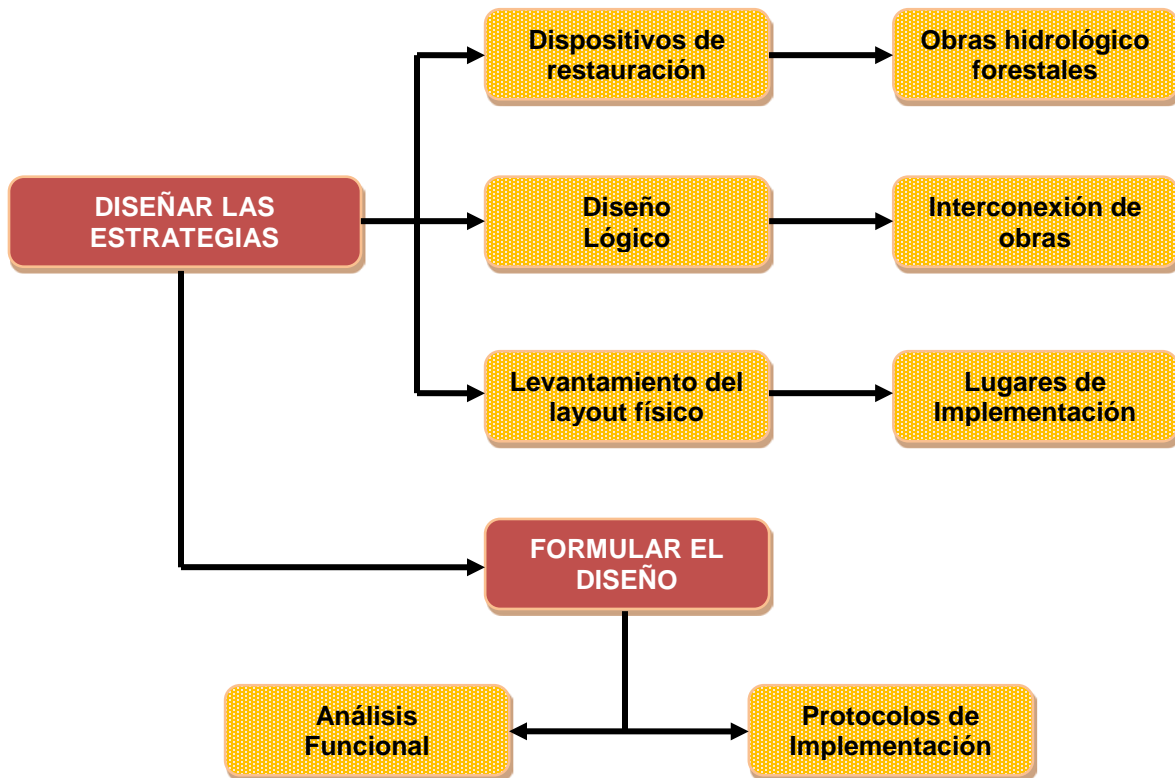
### 5.3. ESPECIFICACIÓN

Definidos los pasos anteriores se procede a determinar la especificación del modelo, el cual está definido por dos pasos:

- Diseño de estrategias
- Formulación del diseño

En el primer paso deben definirse donde van las cosas, es decir, los sitios específicos de la implementación de los dispositivos, que en otras palabras, fundamente la implementación de las obras hidrológico – forestales. De la misma forma se especifican las obras precisas y su interconexión en las microcuencas de Alto Loica. Todo lo anterior se efectúa durante inspecciones en terreno.

Una vez efectuado el diseño de estrategias se procede a formular el diseño. En este punto se establecen las funcionalidades de las obras de restauración al igual que los protocolos de implementación, es decir, se determinan los elementos necesarios para su implementación; así como la definición de los estándares y las estrategias de soporte.



**Figura 5.5. Esquemización de la metodología de la fase de especificación.** La especificación define básicamente dos pasos: diseño de estrategias y la formulación del diseño. El primero define los dispositivos utilizados en la restauración, como estos se interconectan y como se sitúan para que las sinergias ocasionadas entre ellos y el medio ambiente lleve a cabo un proceso óptimo. El segundo en cambio define la funcionalidad de los dispositivos y los protocolos necesarios para su implementación en las microcuencas. Fuente: Elaboración propia.

## 5. 4. EVALUACION

### 5.4.1. Metodología para el análisis de la situación pos intervención

#### 5.4.1.1. Descripción de la situación actual de las microcuencas

Básicamente, la situación inicial especificará las condiciones de las microcuencas antes del inicio del proyecto (año 1990); principalmente, las condiciones estarán abocadas a la cobertura vegetal. El levantamiento inicial de la información se efectúa en dos fases: en terreno y en laboratorio.



**Figura 5.6. Metodología para la determinación de la situación inicial.** Los análisis en terreno implican la georreferenciación con GPS para la delimitación de las microcuencas. El levantamiento de la información es llevada a soportes informáticos –como Googleearth y los archivos inpe– para su análisis, y de esta forma geolocalizar las microcuencas a través de Arcgis y determinar la cobertura vegetal. Fuente: Elaboración propia.

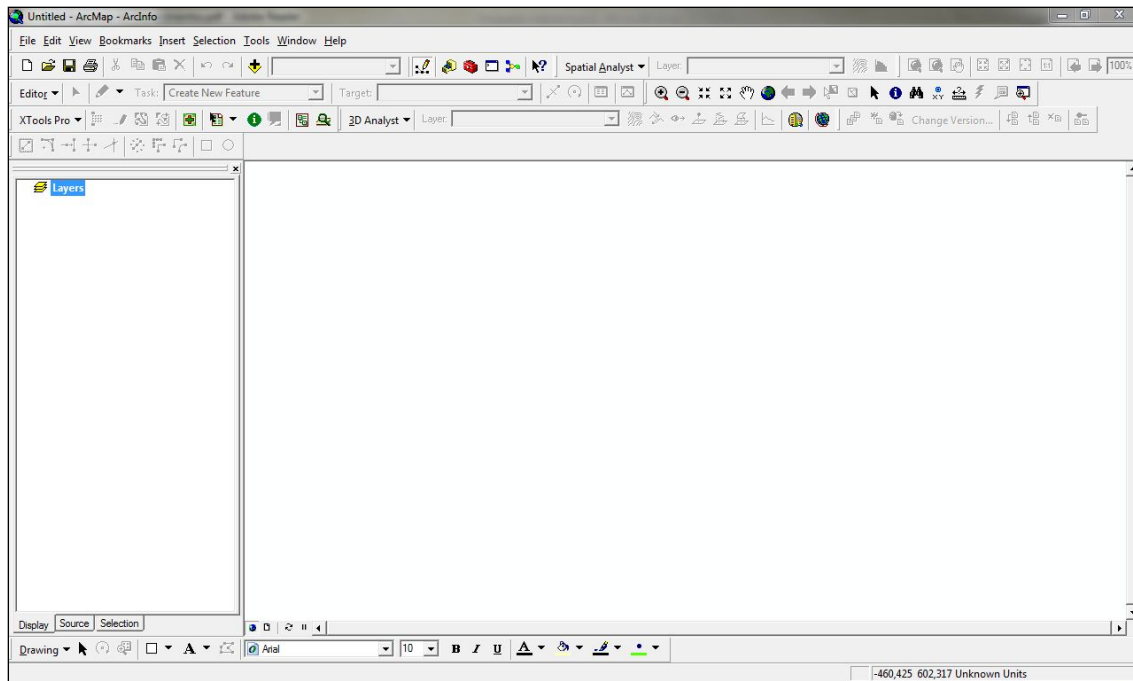
De esta forma la primera fase se constituye de la siguiente forma:

a) *Terreno*: la georreferenciación trata básicamente de localizar ciertos puntos y darles la ubicación espacial específica mediante GPS<sup>57</sup>. Para esto se utilizan las cartas y mapas del lugar confeccionadas por Trivelli (2006). Una vez ubicados en el lugar de trabajo se localizan y marcan las coordenadas<sup>58</sup> de 5 puntos en la microcuenca 1; 4 de ellos se efectúan en los bordes superiores de la cuenca (para delimitar los límites en los soportes informáticos) y cada uno según los puntos cardinales, el 5º se efectúa en el centro de la microcuenca. El recorrido comienza en la microcuenca 1 y posteriormente se efectúa el mismo procedimiento para las 3 microcuencas restantes. Los puntos se llevan a una planilla excel siendo posteriormente llevados al soporte Arcgis.

<sup>57</sup> Los sistemas de georreferenciación para GPS se efectúan en base a 3 sistemas de coordenadas: PSAD–56, SAD–69 y WGS–84. Este último es el aceptado oficialmente para Chile y es el utilizado en este trabajo.

<sup>58</sup> Generalmente el sistema más usado es el sistema de latitud y longitud (paralelos y meridianos) determinándose para ello los minutos y segundos. En este trabajo se utilizarán coordenadas UTM.

Conjuntamente con esto, se identifican las especies arbóreas, utilizándose para ello la guía de campo de Chinery (1988) y las guías de reconocimiento de árboles de Donoso (1989) y Buzunariz y colaboradores (2010).



**Figura 5.7. Plantilla básica de Arcgis.** La superposición de capas con información es la esencia de Arcgis, permite visualizar datos alfanuméricos en forma integrada con el fin de obtener información. El cruce de capas origina nuevos datos que a su vez permiten complementar la base existente. Fuente: Santiago, 2005

b) *Uso de soportes informáticos en laboratorio:* Los datos son llevados a los programas respectivos estableciéndose la siguiente temática:

- Localización de la zona de trabajo en GoogleEarth mediante los puntos geolocalizados en las microcuencas
- Traspaso de la información a Arcgis formando los layer respectivos
- Identificación y sectorización de las microcuencas en la plantilla Arcgis, e identificación de los cauces respectivos aplicando la clasificación de Horton.
- Establecimiento de las curvas de nivel
- Descarga de los archivos inpe<sup>59</sup> de los años 1995, 2000, 2005 y 2010. Posteriormente los archivos son llevados a arcgis, transformándose en una nueva capa de información
- Determinación de la cobertura vegetal para las 4 microcuencas para los mencionados años.

El uso de imágenes satelitales permite el reconocimiento del área de estudio, lo que conlleva al análisis de varias características propias del terreno mediante la teledetección. Las imágenes satelitales presentan características multiespectrales, las cuales

<sup>59</sup> Instituto de ciencias y tecnología. Instituto nacional de pesquisas espaciales. <http://www.Inpe.br>



generalmente se dividen en bandas de captación de los satélites que las capturan. En particular, para una mejor apreciación de la vegetación en el análisis de imágenes satelitales la aplicación del Falso Color Convencional (FCC) es una herramienta imprescindible. El FCC se logra seleccionando las bandas del infrarrojo cercano, rojo y verde respectivamente (García, 2013).

En análisis de las imágenes se basa en el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), el cual, es un valor calculado a partir de la combinación de bandas incorporadas en las imágenes satelitales, las cuales cuentan con la información de los valores de reflectividad para distintos rangos de longitud de onda. (García, 2013).

Banda	Longitud de onda (µm)
Azul	0,45 – 0,51
Verde	0,53 – 0,59
Rojo	0,64 – 0,67
Infrarrojo cercano	0,85 – 0,88

**Tabla 5.1. Rango de longitudes de onda para distintas bandas.** Fuente: United States Geological Survey, 2014

El NDVI está definido por la siguiente fórmula, en donde IRC corresponde a los valores de reflectancia para la banda del infrarrojo cercano y R corresponde a los valores de reflectancia para la banda del rojo. Además, los valores resultantes siempre están entre -1 y 1:

$$NDVI = \frac{[(IRC) - (R)]}{[(IRC) + (R)]}$$

#### 5.4.1.2. Metodología para la cuantificación morfométrica de las microcuencas de Alto Loica

Un aspecto fundamental para el trabajo con cuencas hidrográficas es la morfometría. Para ello se obtendrán los parámetros morfométricos para determinar aspectos tales como las dimensiones de la cuenca, el perímetro, altitudes, y todos los aspectos relativos a la red hídrica. La obtención de la morfometría se efectúa básicamente de dos formas: (a) mediante digitalización de la información en Arcgis y (b) mediante fórmulas matemáticas.

Inicialmente se construyen los layer de las microcuencas con la información levantada en terreno, la cual, se digitaliza creando las referencias espaciales necesarias para ser implementadas en el software Arcgis. Posteriormente se procede a la obtención de los parámetros morfométricos mediante las herramientas respectivas, otros parámetros en cambio, se calculan mediante sencillas fórmulas.

Los parámetros morfométricos que se obtendrán se agrupan en tres dimensiones: parámetros de forma, relieve y relativos a la red hídrica. Los primeros entregan información física – espacial de las microcuencas; los segundos información relativa a la conformación del terreno y topografía y el ultimo da información específica respecto a la red de cauces de las microcuencas.

Parámetro morfométrico	Características y obtención
Superficie	Es la superficie, en proyección horizontal, delimitada por la divisoria de aguas. Se determina por Arcgis
Perímetro	Es la longitud de la divisoria topográfica. se mide a partir del punto de salida de la cuenca. Se establece mediante Arcgis
Índice de Gravellius	Es la relación que existe entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de una circunferencia de área igual a la de la cuenca. Cuanto más irregular sea la cuenca, mayor será su coeficiente de compacidad. Una cuenca circular tendrá un coeficiente de compacidad mínimo, igual a 1".
	$K = \frac{0,28 \times P}{\sqrt{A}}$
	<p>Donde:  P: Perímetro de la cuenca  A: Área de la cuenca</p>
Factor de forma	Es la relación entre el ancho medio y la longitud del cauce principal de la cuenca. El ancho medio se obtiene dividiendo el área de la cuenca por la longitud del cauce principal. Una cuenca con un factor de forma bajo está menos sujeta a crecidas que una de la misma área y mayor factor de forma.
	$Kf = \frac{A}{L^2}$
	<p>Donde:  A: Área de la cuenca  L: Longitud del cauce principal</p>
Radio equivalente	Corresponde al radio de una circunferencia que ocupe la mayor área posible en la superficie de la cuenca

**Tabla 5.2. Parámetros morfométricos de forma.** Los parámetros de forma establecen los aspectos físicos de la cuenca como su dimensionalidad en el espacio. En la tabla se exponen los 6 parámetros básicos respecto de este parámetro, así como su forma de obtención. Fuente: (Nania, 2003).

Continuación tabla 5.2.

Parámetro morfométrico	Características y obtención
Rectángulo equivalente	<p>El rectángulo equivalente de una cuenca es un rectángulo que tiene igual superficie, perímetro, coeficiente de compacidad y distribución hipsométrica que la cuenca en cuestión.</p> $L = \frac{P + \sqrt{P^2 - 16S}}{4}$ $l = \frac{P - \sqrt{P^2 - 16S}}{4}$

La tabla 5.2, muestra los parámetros morfométricos de forma que son necesarios –como se mencionó en párrafos anteriores– para establecer las dimensiones físicas y territoriales de la cuenca. De esta forma, la características espaciales de la cuenca se verán reflejados en la cuantificación dada a estos parámetros.

Los parámetros de relieve contemplan la cuantificación de 9 parámetros, los cuales son: curva hipsométrica, altitud máxima, altitud mínima, amplitud de relieve, altura media, pendiente media de la cuenca, altura mediana, coeficiente de masividad y coeficiente orográfico. El conocimiento de estos parámetros es vital para conocer las características topográficas y como la cuenca se comporta ante ciertos eventos. Por ejemplo, la amplitud de relieve es importante para determinar la energía cinética de los cauces y ante ello determinar los caudales y crecidas, tanto de tributarios como del cauce principal (Gomez, 2002).

Los modelos digitales de elevación (DEM) son esenciales para la estimación de estos parámetros en Arcgis. Las curvas de altitud a su vez son claves para trabajar con la curva hipsométrica y la determinación de las altitudes (máxima y mínima) y los elementos que se obtengan de ellas.

Parámetro morfométrico	Características y obtención
Curva hipsométrica	Es la representación gráfica del relieve de una cuenca. Es una curva que indica el porcentaje de área de la cuenca o bien la superficie de la cuenca en Km <sup>2</sup> que existe por encima de una cota determinada. Una curva hipsométrica puede darnos algunos datos sobre las características fisiográficas de la cuenca. Por ejemplo, una curva hipsométrica con concavidad hacia arriba indica una cuenca con valles extensos y cumbres escarpadas y lo contrario indicaría valles profundos y sabanas planas. La curva hipsométrica se obtiene con Arcgis
Altitud máxima	Es la altitud del punto más alto sobre el nivel del mar de la cuenca. Se determina con las curvas de nivel en Arcgis
Altitud mínima	Es la altitud del punto más bajo sobre el nivel del mar de la cuenca. Se determina con las curvas de nivel en Arcgis
Amplitud de relieve	Se define como la diferencia entre la altitud máxima menos la altitud mínima. $Amp = h_{max} - h_{min}$
Altura media	Consiste en el cociente entre el volumen de la cuenca (superficie comprendida entre la curva hipsométrica y los ejes coordenados) y su superficie". $Hm = \frac{V}{A}$ Donde: V: Volumen de la cuenca A: Área de la cuenca
Pendiente media de la cuenca	Consiste en la media ponderada de las pendientes de todas las superficies elementales en las que la línea de máxima pendiente es constante" $J = 100 \frac{(\sum Li \times E)}{A}$ Donde: ΣLi : Suma de las longitudes de las curvas de nivel E : Equidistancia entre las curvas de nivel A : Superficie de la cuenca

**Tabla 5.3. Parámetros morfométricos de relieve.** Estos parámetros definen principalmente la estructura y topografía del terreno para determinar aspectos como altitudes y la influencia que estos elementos tienen en el comportamiento de la cuenca y la respuesta que esta presenta ante eventos naturales. La curva hipsométrica es importante para relacionar porcentaje de superficie y altitud (Nania, 2003), mientras que los otros elementos son necesarios para (por ejemplo) determinar erosividad. Fuente: Gómez, 2002.

Continuación tabla 5.3.

Parámetro morfométrico	Características y obtención
Altura mediana	Se obtiene de la curva hipsométrica entrando con la mitad de la superficie, por tanto es la altura para la cual las áreas quedan igual repartidas.
Coeficiente de masividad	“Este parámetro permite diferenciar cuencas de igual altura media pero de relieve distinto. Este coeficiente puede dar valores iguales para cuencas distintas, por lo que no sería como tal valido para definir la erosión”.
	$Tga = \frac{Hm}{A}$
	<p>Donde:  Hm : Altura medias de la cuenca  A : Área de la cuenca</p>
Coeficiente orográfico	Este índice combina los dos parámetros del relieve actuantes en los procesos erosivos: la altura media, sobre la energía potencial del agua; y la inclinación característica de las laderas de la cuenca, sobre la energía cinética del flujo de la escorrentía superficial”.
	$CO = Hm \times Tga$
	<p>Donde.  Hm : Altura media  Tga : Coeficiente de masividad  Si: CO &gt; 6 → Relieve accidentado</p>

Los parámetros morfométricos relativos a la red hidrográfica hacen alusión al comportamiento y estructuración de la red de cauces de la cuenca hidrográfica. En la tabla 5.4 se describen 8 parámetros de este tipo, estos son: longitud del cauce principal, frecuencia de drenaje, densidad de drenaje, coeficiente de torrencialidad, distancia boca – centro de gravedad, distancia boca – punto más alejado, amplitud de cota, pendiente media del cauce principal.

La determinación de estos parámetros es esencial para conocer el comportamiento hídrico de la cuenca y como los cursos de agua se estructuran al interior de ella, conformando una intrincada red que posibilita que la cuenca entregue bienes y servicios. El levantamiento de la información se efectúa con archivos DEM y con mapas de la zona para conocer la distribución de los tributarios, efluentes, y cauce principal.

Parámetro morfométrico	Características y obtención
Longitud del cauce principal	Longitud del cauce más extenso de la cuenca. Este cauce nace en la zona alta de la microcuenca y termina en la boca de la cuenca. Su longitud se determina con Arcgis
Frecuencia de drenaje	Consiste en el número de cauces de cualquier orden entre la superficie de la cuenca. $Fd = \frac{NTC}{A}$ Dónde: NTC: Número total de cauces A : Área de la cuenca
Densidad de drenaje	“Consiste en la longitud media de curso por unidad de superficie”. $D = \frac{\sum Li}{A}$ Dónde: $\sum Li$ : Suma de las longitudes de los cursos que se integran en la cuenca A : Área de la cuenca
Coefficiente de torrencialidad	Consiste en el cociente entre el número de cauces de orden y el área de la cuenca. Al ser cauces (de orden 1) con un tiempo mínimo de concentración, este valor es directamente proporcional a la torrencialidad del cauce principal. . $Ft = \frac{NC1}{A}$ Dónde: NT1: Número de cauces de orden 1 A : Área de la cuenca
Distancia Boca – Centro de gravedad	Es la longitud existente entre la boca de la cuenca (desembocadura) y el lugar donde confluyen el 50 % de las aguas de la cuenca. Este valor es inversamente proporcional a las crecidas del cauce principal. Se obtiene mediante Arcgis
Distancia Boca – Punto más alejado	Consiste en la longitud desde la boca o desembocadura de la cuenca hasta el sector más alejado, por lo general el punto de más alta cumbre. Se obtiene mediante Arcgis

**Tabla 5.4. Parámetros relativos a la red hidrográfica.** Estos parámetros son indicadores del comportamiento de los cursos hídricos de una cuenca. La cuantificación de ellos permite conocer elementos como susceptibilidad de crecidas, torrencialidad, comportamiento en épocas invernales e irrigación de la cuenca entre otros. De esta forma, no solo es factible conocer la morfofuncionalidad de los tributarios y efluentes de una cuenca, sino que además permite la implementación de planes de manejo al interior de ella. Fuente: (Gómez, 2002).

Continuación tabla 5.4.

Parámetro morfométrico	Características y obtención
Amplitud de cota	<p>Consiste en la diferencia entre la altura máxima menos la altura mínima del cauce principal. Este valor es directamente proporcional a la torrencialidad del cauce principal.</p> $A_{cota} = H_{max} - H_{min}$
Pendiente media del cauce principal	<p>Con este parámetro se ve la pendiente media del río y su potencial para erosionar".</p> $J = \frac{H_{max} - H_{min}}{L} \times 100$ <p>Dónde:            Hmax: Altura máxima del cauce principal            Hmin : Altura mínima del cauce principal            L : Longitud del cauce principal</p>

**Parámetros relativos a la red hídrica creados como parte de las originalidades del trabajo**

- a) Factor de irrigación: Consiste en el recíproco del número total de nodos de la cuenca. Los nodos son los puntos de unión de un tributario con un cauce de igual orden o mayor. Este valor es inversamente proporcional a la irrigación de la cuenca.

$$Fi = \frac{1}{Nn}$$

Dónde:  
 Nn: Número de nodos de la cuenca

- b) Densidad de irrigación: Consiste en la relación entre el número de nodos y la superficie de la cuenca.

$$Di = \frac{Nn}{A}$$

Dónde:  
 Nn : Número de nodos de la cuenca  
 A : Área de la cuenca

### 5.4.1.3. Metodología del modelo heurístico para la cuantificación de los impactos ambientales en Alto Loica.

Los modelos son esencialmente representaciones de la realidad o contribuyen a representar determinados fenómenos o comportamientos de sistemas dinámicos de orden aleatorio (Bustos, 2014).

La creación de un modelo heurístico que permitiera cuantificar el grado de daño ocurrido en las microcuencas constituye uno de los aportes de este trabajo, por lo que los parámetros y magnitudes planteadas para la cuantificación de los daños presentes en Alto Loica fueron creados específicamente y solo para dicho propósito.

Parámetro	Codificación	Descripción
Amplitud geográfica	A	Considera si el daño ocasionado se restringe únicamente a la microcuenca o si tiene el potencial sistémico para dañar a las zonas aledañas o lejanas.
Probabilidad de daño colateral	P	Considera si el daño ocasionado en una matriz presenta el potencial de dañar a otra matriz medioambiental.
Consecuencia	C	Considera la magnitud de los daños ocasionados en las microcuencas, en lo que respecta al tiempo de permanencia de sus efectos y si requiere o no intervención humana.
Reversibilidad	R	Considera si se puede restituir la zona afectada a las mismas condiciones iniciales que tenía el ecosistema antes del daño ecológico y si es necesaria o no intervención humana para la recuperación del entorno
Impacto poblacional	I	Considera si los daños ecológicos afectan directa o indirectamente a la población local.

**Tabla 5.5. Descripción de los parámetros considerados en el modelo heurístico.** El modelo implica la cuantificación de 5 parámetros, los cuales, una vez calculados dan como producto un valor que describe un escenario específico. Fuente: Elaboración propia.

A pesar que otros elementos de importancia no estén considerados en el modelo, éste establece parámetros que pueden determinarse en terreno o con la información ya existente. El modelo fue calibrado y analizado en distintos escenarios por lo que sus valores y su tipificación en la rúbrica respectiva fueron reestructurados en muchas ocasiones hasta alcanzar valores cuyas respectivas inferencias fueran lo más cercana posible a la realidad de cada ambiente analizado.



Parámetro	Clasificación	Valor	Descripción
A	Regional	10	El impacto tienen una magnitud tal que afecta a toda la región
	Local	5	El impacto es sistémico generando daño a la localidad aledaña a la microcuenca
	Acotado	1	El impacto solo genera daño en la microcuenca
P	Siempre	8	El grado de daño sobre el medio ambiente hacen factible que en un rango $> 75\%$ ocurra un impacto ambiental negativo en otro elemento del medio ambiente
	Generalmente	6	El grado de daño sobre el medio ambiente hacen factible que en un rango $50\% < x \leq 75\%$ ocurra un impacto ambiental negativo en otro elemento del medio ambiente
	Probable	4	El grado de daño sobre el medio ambiente hacen factible que en un rango $25\% < x \leq 50\%$ ocurra un impacto ambiental negativo en otro elemento del medio ambiente
	Remoto	2	El grado de daño sobre el medio ambiente hacen factible que en un rango $\leq 25\%$ ocurra un impacto ambiental negativo en otro elemento del medio ambiente
C	Critica	8	El daño provoca daños múltiples de gran magnitud con efectos a largo plazo y requiere intervención humana inmediata
	Grave	6	El daño provoca alteración significativa, requiere mediante intervención humana
	Moderada	4	El daño provoca cambios notorios con respecto a la situación original. Reversible en forma natural
	Despreciable	2	La alteración no implica cambios significativos para el medio ambiente
R	Muy Baja	10	El impacto es tal que es muy difícil restituir el elemento afectado, o la resiliencia es muy baja. Solo con técnicas oportunas y de alto impacto puede revertirse parte de la situación
	Baja	8	El nivel de daño no afectó la resiliencia, aunque la posibilidad de revertir la situación es baja. Solo con intervención humana la situación es reversible.
	Limitada	6	La restitución del bien afectado es factible pero hasta cierto nivel. Se necesita intervención humana para recuperar el bien afectado
	Alta	4	La naturaleza puede restituir parte del elemento natural afectado, la intervención humana con acciones de bajo impacto puede contribuir a revertir la situación.
	Muy alta	2	La posibilidad de revertir el daño es muy alta y solo por acción natural
I	Muy severo	8	Afecta los recursos que sustentan directamente a la población, alterando su fuente de ingresos, además de producir daños a la salud de la población
	Severo	6	Afecta los recursos que sustentan directamente a la población, alterando su fuente de ingresos.
	Bajo	4	Afecta gravemente los recursos naturales pero no afectan a la población local.
	Muy bajo	2	Solo afecta la calidad del paisaje no afectando a la población

**Tabla 5.6. Cuantificación de los parámetros del modelo.** Cada parámetro cuenta con un conjunto de valores posibles en función de la cuantificación de cada uno de ellos según el escenario estudiado, en este caso específico, Alto loica. Fuente. Elaboración propia.

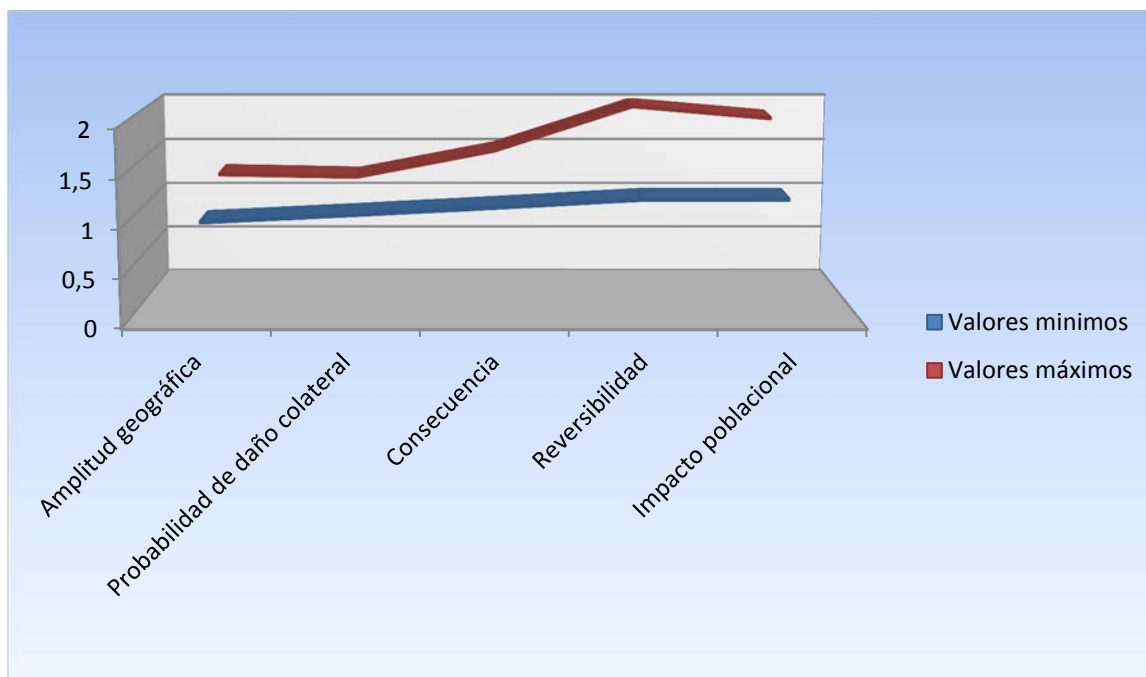
factor	Subfactores
Suelo	Erosión, desertificación, compactación
Agua	Sedimentación, turbidez, pérdida de vida animal
vegetación	Pérdida de abundancia, pérdida de biodiversidad, pérdida de cobertura

**Tabla 5.7. Factores y subfactores del modelo.** Elementos cuantificables para la determinación de daño ambiental en las microcuencas. Fuente: Elaboración propia.

Una vez identificada la intensidad del impacto ambiental y establecidos los valores respectivos, se obtiene el valor del “parámetro de impacto en cuencas” ( $PIC_x$ ), para ello se llevan los valores a las siguientes ecuaciones:

- Para un solo subfactor (1)

$$PIC(1) = A^{0,1} + P^{0,1} + C^{0,2} + R^{0,3} + I^{0,3}$$



**Figura 5.8. Rango para los valores máximos y mínimos de las variables de  $PIC_1$ .** La línea azul indica los valores mínimos que en la ecuación para un solo subfactor pueden tomar los parámetros descritos anteriormente y en línea roja, los valores máximos (ambos una vez elevados a la potencia respectiva). Por lo tanto, los valores de un subfactor estarán circunscritos a la nube de puntos entre las dos líneas. Fuente: Elaboración propia.

- Para un solo factor (2)

$$PIC(2) = \sum [Sf(2)]$$

- Para más de un factor (3)

$$PIC(3) = [\sum (Sf(s))^{0,4} + \sum (Sf(a))^{0,3} + \sum (Sf(v))^{0,3}] \times 100$$

En la última ecuación se obtiene el valor final que localizado en la amplitud respectiva en la tabla mostrada abajo, puede determinarse el grado de daño y las características de éste. Aunque se consideran solo 3 factores (suelo, agua y vegetación), estos se determinaron por las características del entorno<sup>60</sup> y por los ajustes hecho al modelo. En otras circunstancias y según los objetivos de trabajo pueden añadirse otros factores mas (como fauna, calidad del aire, etc...)

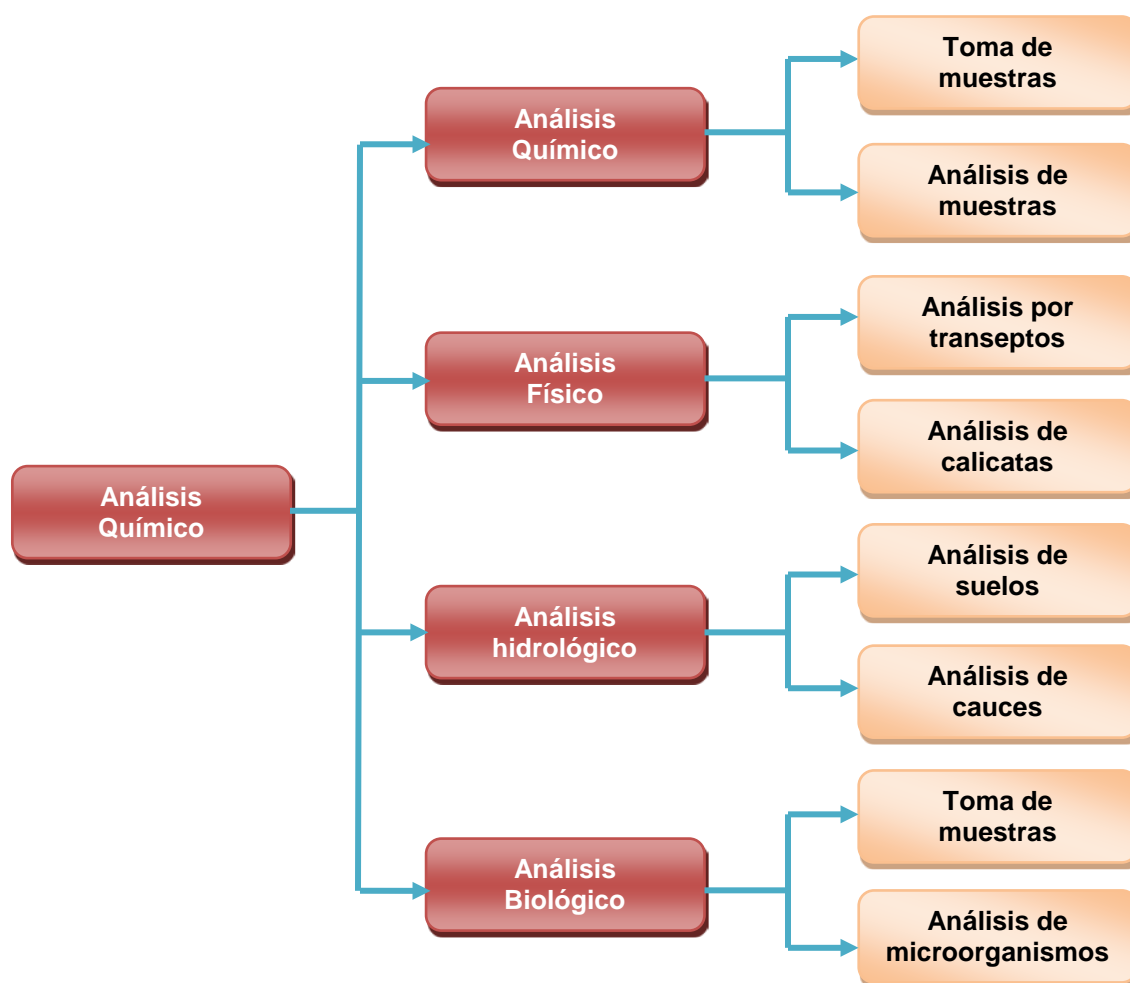
Amplitud	Grado de daño	Característica
$776 \leq PIC_3 < 794$	Muy Bajo	El daño ocasionado al medio ambiente puede ser revertido de manera natural por el entorno o en su caso, se necesitan acciones puntuales y de baja tecnificación para remediar efectos concretos.
$794 \leq PIC_3 < 812$	Bajo	El daño puede ser revertido por el medio ambiente pero hasta cierto punto. Se necesita intervención humana para restaurar problemas puntuales. No hay riesgo para la población.
$812 \leq PIC_3 < 830$	Medio	El daño ocasionado al ecosistema no ha afectado la resiliencia de los recursos naturales. Aunque por si solo el ecosistema no podrá revertir los efectos. Se necesitan acciones concretas e intervención directa para restaurar el lugar.
$830 \leq PIC_3 < 848$	Alto	Los daños son visibles y severos en el medio ambiente. Una o más matrices ambientales están alteradas generándose daños sistémicos en el lugar. Solo la intervención directa del hombre mediante sistemas tecnificados puede revertir la situación.
$848 \leq PIC_3 \leq 867$	Muy Alto	El daño ocasionado es muy alto afectando la resiliencia de los recursos naturales. El ecosistema está absolutamente alterado afectando flora y fauna. Se necesitan acciones sistémicas, de largo plazo y alto costo para restaurar el ecosistema. Ciertos recursos pueden haber desaparecido del entorno

**Tabla 5.8. Graduación de los valores del parámetro de impacto en cuencas para más de un factor (PIC<sub>3</sub>).** Los valores son adimensionales y fluctúan entre 776 y 867 como valores mínimo y máximo respectivamente. La clasificación del “grado de daño en la microcuenca” está en función del valor obtenido para la sumatoria de los factores obtenido en la ecuación 3. Fuente: Elaboración propia.

<sup>60</sup> Cabe recordar que solo una de las microcuencas está habitada, y por solo una familia. Los suelos son forestales y la biodiversidad faunística es baja, remitiéndose solo a algunos roedores, aves rapaces y algunos anfibios, entre otros.

#### 5.4.2. Descripción y análisis integral de suelos

El análisis de suelos resulta vital para posteriormente extrapolar las variables al modelo fenomenológico, el que a su vez, se alimentará de las variables existentes en las microcuencas experimentales. Por ello, conocer la constitución y comportamiento del suelo en todas sus dimensiones resulta vital para los objetivos finales de la investigación. Por ello el análisis del suelo se estructuró en cuatro grandes dimensiones: Análisis químico para determinar los elementos (distribución y concentración) y propiedades químicas en el suelo; el análisis físico busca determinar cómo se estructura el suelo y cuál es la proporción y distribución de sus componentes básicos (profundidad y composición de sus horizontes); el análisis hidrológico es fundamental para conocer el comportamiento del agua en el suelo y el análisis biológico que busca determinar la distribución de microorganismos (bacterias y hongos).



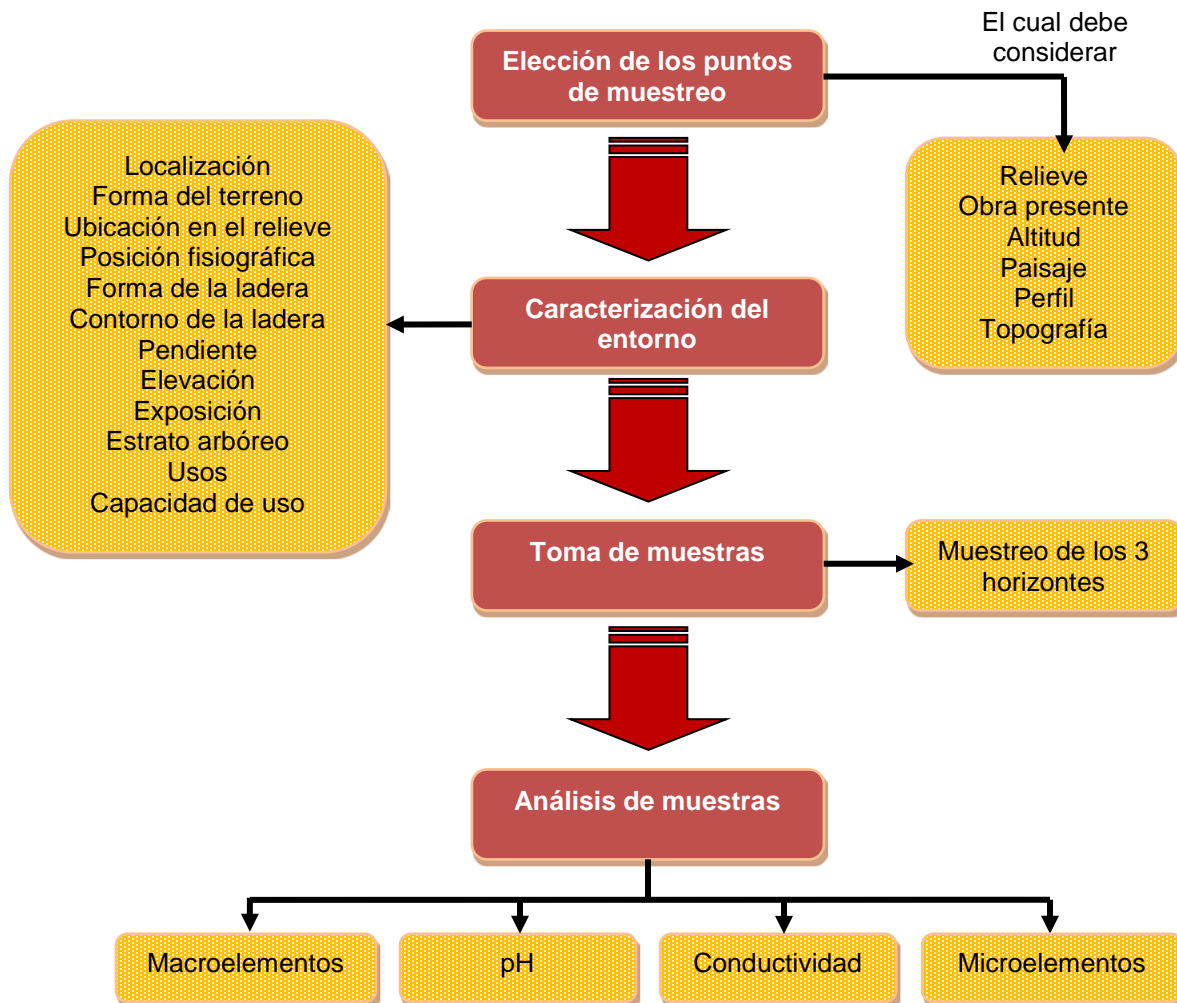
**Figura 5.9. Estructura general de la metodología para el análisis integral de suelos.** El término "integral" implica que el análisis contempla la mayor cantidad de variables y dimensiones del suelo. Siendo estas de orden químico, que implica la constitución de los componentes del suelo; el análisis físico cuyo fin es determinar su conformación y estructura; el análisis hidrológico tienen como objetivo analizar el comportamiento del agua en el suelo y como este responde a los eventos pluviométricos, indispensables para el soporte de vida y finalmente la distribución y variación de la flora bacteriana. Fuente: Elaboración propia.

### 5.4.2.1. Análisis químico

Se consideraron 8 puntos de muestreo: uno en la microcuenca 1, 5 en la microcuenca 2, 1 en la microcuenca 3 y 1 en la microcuenca 4. Básicamente, el parámetro de elección se centró en las características de restauración y rehabilitación de los lugares elegidos.

El análisis químico del suelo se establece en base a los siguientes pasos:

- Elección de los puntos de muestreo
- Características del entorno del lugar de toma de muestras
- Toma de muestras
- Análisis de las muestras.



**Figura 5.10. Estructura de la metodología para el análisis químico de suelos.** El análisis químico de suelos implica ciertos pasos previos antes de efectuar el análisis químico propiamente tal. La elección del sitio de donde se obtendrán las muestras obedece a criterios previamente tipificados para obtener la mayor representatividad posible. Por ello es importante además analizar el entorno del lugar de donde se obtendrán las muestras. Posteriormente el análisis como tal implica la determinación de nutrientes y características como el pH y conductividad eléctrica, entre otros. Fuente: Elaboración propia.

#### 5.4.2.1.1. Caracterización del entorno del lugar de toma de muestras

La caracterización del entorno del sitio de donde se toman las muestras de suelo es de vital importancia, ya que, aporta información relevante respecto a la constitución de éste (Cortés, 2007). Los criterios y elementos de análisis del entorno son los siguientes, según Schlatter y colaboradores (2003):

##### a) Localización

La localización se refiere a la situación de los puntos de toma de muestra en las microcuencas, por lo que esta se efectúa con GPS en coordenadas UTM con Datum WGS – 84. A diferencia de otros tipos de coordenadas, tales como latitud y longitud<sup>61</sup> (muy utilizadas actualmente en actividades marítimas), las coordenadas UTM son más utilizadas en la geografía terrestre y son aceptadas internacionalmente (Domínguez, 2000):

##### b) Forma del terreno

La clasificación de este parámetro se efectuará según la clasificación realizada por Schlatter y colaboradores (2003). Para ello, la forma del terreno se catalogará en 3 formas según las siguientes características:

<i>Terrenos altos</i>	: De alta energía erosiva pueden ser: planos a ligeramente ondulados, ondulados a quebrados o montañosos
<i>Terrenos intermedios</i>	: Con fuerzas de menor intensidad, pueden ser: planos a ligeramente ondulados, ondulados a quebrado o montañosos
<i>Terrenos bajos</i>	: De baja energía, pueden ser: plano a ligeramente ondulados o ondulados

##### c) Ubicación en el relieve

La ubicación en el relieve considera 7 elementos distintos, con los cuales, se clasificarán los sectores en los cuales se tomarán las muestras (Schlatter, et al, 2003). Para ello se utilizarán los siguientes criterios:

<i>Cumbre</i>	: Cima de cerros, colinas o lomajes
<i>Cresta</i>	: Cumbre alargada con laderas de caídas bruscas
<i>Canto</i>	: Borde de un pronunciado cambio de pendiente
<i>Ladera</i>	: Terreno inclinado en cerros, colinas o lomajes. Se subdivide en: alta para el tercio superior, media para la extensión intermedia y baja para el tercio superior.
<i>Piedmont</i>	: Pie de ladera, acumulación coluvial de sedimentos
<i>Cabeza de valle</i>	: Inicio de un valle, generalmente de sedimentos gruesos y suelos jóvenes por la alta erosividad aluvial
<i>Hondonada</i>	: Hendidura o depresión (de tamaño variado) en laderas o planos.

<sup>61</sup> Se basan en la ubicación mediante grados, minutos y segundos, su utilidad marítima se debe a que un minuto de grado equivale a una milla náutica (1852 mt), medida utilizada para medir distancias marítimas.

#### d) Posición fisiográfica

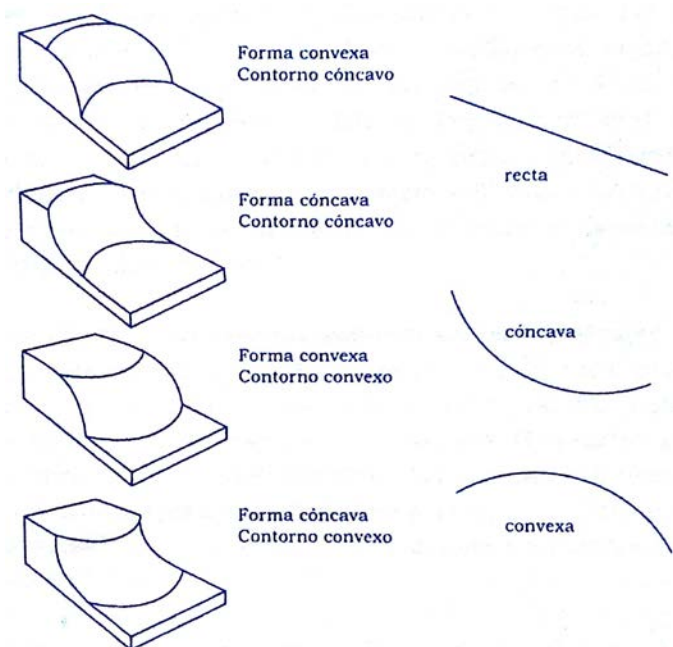
Ubica al sitio en una unidad paisajística particular e indica el grado de erosividad local (Schlatter, et al, 2003).

Posición fisiográfica	Descripción y características
<b>Terraza marina</b>	Antiguos bancos o planos sedimentarios de desgaste marino cortados por la acción de las olas e interrumpidas por diferentes líneas de costas sumergidas
<b>Terraza aluvial</b>	Terrenos formados por sedimentos de ríos o esteros en llanuras aluviales anteriores interrumpidas por líneas de desgaste fluvial o lacustre. En este término se incluyen también las terrazas de origen lacustre.
<b>Terraza o plano remanente</b>	Terrenos de posición alta, restos de planicies, disectadas por la erosión aluvial y/o glacial
<b>Plano lacustre</b>	Terrenos formados por una sedimentación lacustre anterior de texturas finas a muy finas.
<b>Plano fluvioglacial</b>	Formas glacio-fluviales originada del transporte y depósito fluvial del material dejado por un glacial en retroceso
<b>Plano aluvio-coluvial</b>	Suelos ubicados en posición de plano inclinado suave, con depósito de materiales transportados por el agua. Presentan clastos redondeados y angulares
<b>Meseta o altiplano</b>	Corresponden a suelos de planicies altiplánicas
<b>Abanico aluvial o cono</b>	Depósito de aluvión en forma de abanico que se origina donde un curso de agua, fuertemente cargado de materiales aluviales y coluviales, emerge de las montañas y entra en los terrenos bajos
<b>Cuenca de sedimentación</b>	Valles amplios donde se depositan sedimentos de desgaste de los terrenos circundantes
<b>Dunas</b>	Acumulaciones de arena por el viento
<b>Escarpe o acantilado</b>	Unidad con pendiente fuerte o quiebre topográfico en la cual es difícil encontrar suelos
<b>Colinas</b>	Topografía fuertemente ondulada o quebrada
<b>Cerro o monte</b>	Unidad rocosa aislada por la erosión o por el relleno de sedimento en sus contornos, correspondiendo a cerros islas
<b>Lomajes</b>	Se refiere a antiguas planicies que han sido trabajadas y erosionadas por corrientes de agua. Se ha perdido parte de la topografía original, dando origen a un lomaje ondulado
<b>Morrenas</b>	Materiales sin selección arrastrados y depositados por el hielo, a menudo se caracterizan por un agrupamiento de colinas o lomas
<b>Valle</b>	Área de sedimentación formado por erosión y ubicado entre montañas o colinas en forma de "V" (fluvial) o "U" (glacial)
<b>Pendiente de Piedmont</b>	Terrenos que ocupan una posición de plano inclinado al pie de laderas montañosas y formadas por sedimentos coluviales, caídos o rodados por gravedad desde posiciones altas.

**Tabla 5.9. Unidades paisajísticas para determinar la posición fisiográfica.** Esta clasificación es la utilizada para determinar la posición fisiográfica de un punto particular. Fuente: Schlatter, et al, 2003.

### e) Forma y contorno de la ladera

La forma se evalúa en dos sentidos: el radial o altitudinal (subiendo o descendiendo la ladera) y el contorno o la trayectoria de la curva de nivel (Schlatter, et al, 2003)



**Figura 5.11. Formas más comunes de laderas y contornos.** Dependiendo de la combinación de estos dos conceptos puede haber laderas con riesgos de erosividad o deslizamientos. Fuente: Schlatter, et al, 2003.

### f) Pendiente

La pendiente o ángulo de inclinación se mide en grados o porcentajes y es un elemento importante para el drenaje, la erosividad y la estabilidad del suelo.

Grados (°)	Porcentaje (%)	Denominación	Clase de pendiente
0 – 2	0 – 3	Plano	Suave
2 – 3	3 – 5	Casi plano	Suave
3 – 6	5 – 10	Ligeramente inclinado	Moderada
6 – 9	10 – 15	Inclinado	Moderada
9 – 17	15 – 30	Inclinación pronunciada	Pronunciada
17 – 30	30 – 58	Inclinación muy pronunciada	Pronunciada
30 – 45	58 – 100	Escarpado	Muy pronunciada
> 45	> 100	Muy escarpado	Muy pronunciada

**Tabla 5.10. Cuadro para la determinación de pendiente.** Mientras mayor es la pendiente más rápido es el drenaje y mayor el riesgo de erosión y deslizamiento de tierras. Fuente: Schlatter, et al, 2003.



### **g) Elevación**

Denominada también altitud (considera la altura tomando como punto de inicio el nivel del mar), se relaciona con las características del clima y la erosividad. Su medición se efectúa con altímetro o GPS y se expresa en msnm (metros sobre el nivel del mar).

### **h) Exposición**

Dice relación con los puntos cardinales (N, NO, NE, E, O, S, SO y SE). Se determina con brújula

### **i) Estrato arbóreo**

El estrato arbóreo de un sitio se obtiene en terreno analizando alrededor y observando la vegetación arbórea y arbustiva en el sector. Básicamente se toma nota de aspectos tales como:

- Presencia de árboles
- Presencia de arbustos
- Presencia de sotobosque
- Densidad de la vegetación
- Vegetación alóctona y autóctona
- Plantación forestal y plantación comestible

### **j) Usos**

Los “usos” hacen alusión a obtener información acerca de la capacidad del suelo para la obtención de bienes y servicios. Esto se analiza en dos fases: uso anterior y uso actual. El uso anterior se obtiene por datos históricos obtenidos de las fuentes del proyecto CONAF–JICA, La Municipalidad de San Pedro y los lugareños que habitan en las cercanías de las microcuencas (o en ellas como en el caso de la microcuenca 3. El uso actual se obtiene de las fuentes directas del “Programa de cuencas hidrográficas” de la CONAF.

k) Capacidad de uso

Variable	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
<b>Pendiente</b>								
(°)	< 2	< 3	< 6	< 9 ± 1	< 3	< 17 ± 2	< 30 ± 4	> 30 ± 4
(%)	< 3	< 5	< 10 ± 1	< 15 ± 2	< 5	< 30 ± 4	< 58 ± 10	> 58 ± 10
<b>Profundidad fisiológica (cm)</b>	> 120	> 70	> 40	> 20	< 40	> 40	> 20	Cualquiera o inundado
<b>Pedregocidad (%)</b>	< 1	< 5	< 10	< 25	< 75	< 50	< 75	0 - 100
<b>Rocosidad</b>	0	< 2	< 5	< 10	< 25	< 25	< 50	0 - 100
<b>Riesgo de inundaciones</b>	Ninguno a ocasional	Ninguno a frecuente	Ninguno a frecuente	Ninguno a frecuente o prolongado	Ninguno a frecuente y prolongado	Ninguno	Ninguno	Ninguno o terrenos inundados
<b>Susceptibilidad a la erosión</b>	Ninguna a ligera	Ninguna a ligera	Ninguna a moderada	Ninguna a pronunciada	Ninguna a moderada	Ninguna a pronunciada	Ninguna a pronunciada	Ninguna a muy pronunciada
<b>Nivel freático (cm)</b>	> 150	> 100	> 70	> 40	Superficial o sin	--	--	Sin o inundado
<b>Drenaje interno del suelo</b>	Moderado rápido a moderado lento	Moderado lento	Muy rápido a lento	Muy rápido a muy lento	Muy rápido a muy lento	Muy rápido a muy lento	Muy rápido a muy lento	Muy rápido a muy lento

Tabla 5.11. Pauta para determinar capacidad de uso en suelos de secano. La capacidad de uso está determinada por las variables interactuantes en el suelo que por lo general sus son factores limitantes. En base a su capacidad de uso, los suelos se clasifican en 8 clases aumentando las limitantes desde la clase I hasta la clase VIII. Fuente: Schlatter, et al, 2003.

Continuacion tabla 5.11.

Variable	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
<b>Textura</b>	Arenosa a franca limosa	Arena franca a franca arcillosa	Arena limosa a arcilla limosa	Todo el rango	Todo el rango	Todo el rango	Todo el rango	Todo el rango
<b>Consistencia en húmedo</b>	Suelta a friable	Suelta a friable	Suelta a firme	Suelta a muy firme	Suelta a muy firme	Suelta a muy firme	Suelta a muy firme	Todo el rango
<b>Capacidad de agua aprovechable</b>	Alta a moderada	Alta a baja	Alta a baja	Todo el rango	Todo el rango	Todo el rango	Todo el rango	Todo el rango
<b>Disponibilidad de elementos nutritivos</b>	Buena	Buena a moderada	Buena a baja	Buena a baja	Buena a baja	Buena a baja	Buena a baja	Buena a baja
<b>Días libres de heladas</b>	> 140	> 100	> 80	> 50	--	> 50	--	--
<b>Periodo de sequía estival</b>	Corto	Corto	Largo	Muy largo	Muy largo	Muy largo	Muy largo	Cualquiera
<b>Limitaciones climáticas</b>	Ninguna	Ninguna a leves	Ninguna a moderada	Ninguna a severas	Ninguna a severas	Ninguna a severas	Ninguna a severas	Ninguna a muy severas
<b>Intensidad de uso</b>	Cultivos intensos o muy intensos	Cultivos intensos con ligeras limitaciones	Cultivos con limitaciones a forestal intensivo	Cultivos con limitaciones pronunciadas a forestal intensivo	Praderas o forestal con limitaciones	Forestal o praderas con limitaciones	Forestal con limitaciones	Sin uso agrícola, forestal de protección

#### 5.4.2.1.2. Toma de muestras

Para la determinación del análisis químico se toman muestras de suelo disturbado, es decir, sin conservar la estructura natural del suelo. Se considera la toma de muestras de 4 segmentos distintos en un mismo punto:

- Horizonte orgánico litter
- Horizonte de fermentación
- Horizonte orgánico humus
- Horizonte mineral

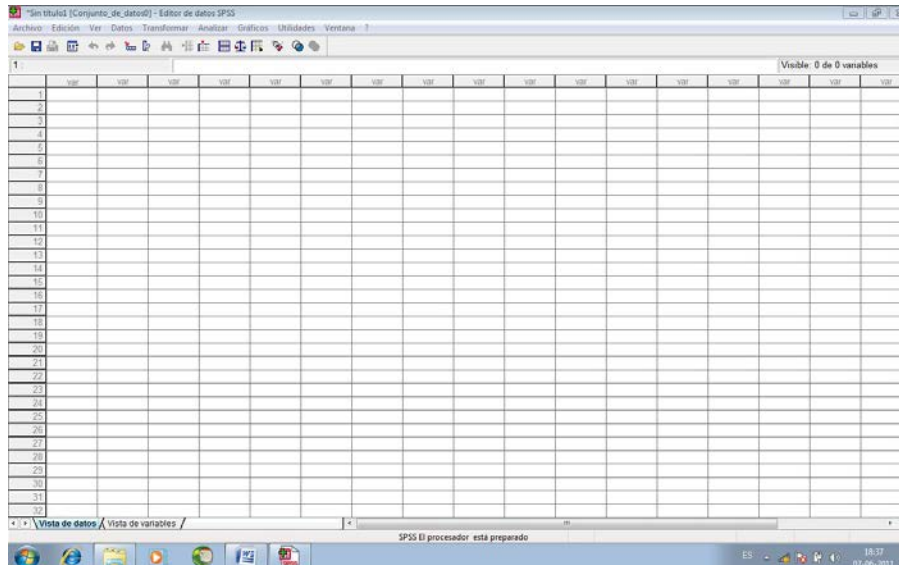
El procedimiento se efectúa según la metodología de Schlatter y colaboradores (2003):

- a) Se efectúan cortes verticales rectos con una pala hasta la profundidad definida. No se hacen tomas de muestras en forma de cuña (más ancha en la superficie y angosta abajo).
- b) Se corta una sección a la profundidad estipulada y se colocan en bolsas plásticas<sup>62</sup> lo suficientemente fuertes para transportarlas..
- c) Para las muestras más profundas se eliminan los restos de mantillo
- d) Se rotulan las bolsas con los datos del sector y la numeración respectiva

#### 5.4.2.1.3. Análisis de las muestras

Una vez envasadas y rotuladas, las muestras se envían al laboratorio del INIA la Platina para su análisis se consideran macroelementos (C, N y P), microelementos (Fe, Zn, Mn, Cu, Ca y B), pH, conductividad eléctrica y materia orgánica.

El estudio de los resultados se efectuará con métodos estadísticos, fundamentalmente con el software SPSS.

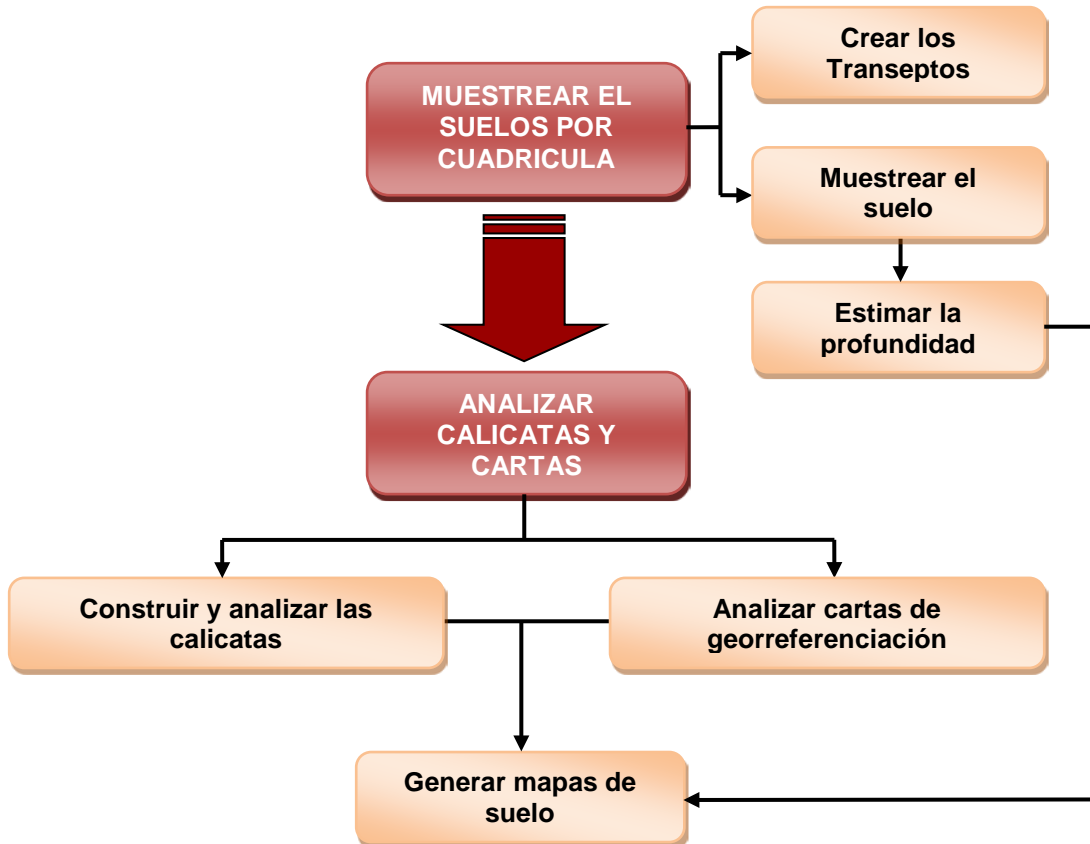


**Figura 5.12. Plantilla básica de SPSS.** Software ampliamente utilizado para análisis estadístico, ya que, posee una amplia gama de aplicaciones para análisis como correlaciones, entre otras.

<sup>62</sup> La bolsa no debe contener nada en su interior (papel, metal, etc...) para evitar la contaminación de la muestra.

#### 5.4.2.2. Análisis físico

El análisis físico del suelo incluye las propiedades que dan al suelo su estructura, caracterización y comportamiento como tal (textura, estructura, pedregocidad, profundidad, etc...). Para ello es indispensable conocer la profundidad del suelo y la estructura del pedón; si se considera que el suelo es un continuo en el espacio; la construcción y análisis de calicatas es el instrumento más adecuado para determinar las características y propiedades físicas de los suelos de Alto Loica.



**Figura 5.13. Metodología para el análisis físico de suelos.** Básicamente la determinación de la estructura y composición del suelo se estructura con 2 grandes pasos: la creación de transeptos en las microcuencas siendo las intersecciones de estos los puntos de muestreo inicial; los resultados de estos muestreos darán las bases para la construcción de las calicatas que serán representativas de un área específica, obteniendo las características del suelo para finalmente construir los mapas respectivos. Fuente: Elaboración propia.

El análisis físico incluye dos grandes etapas.

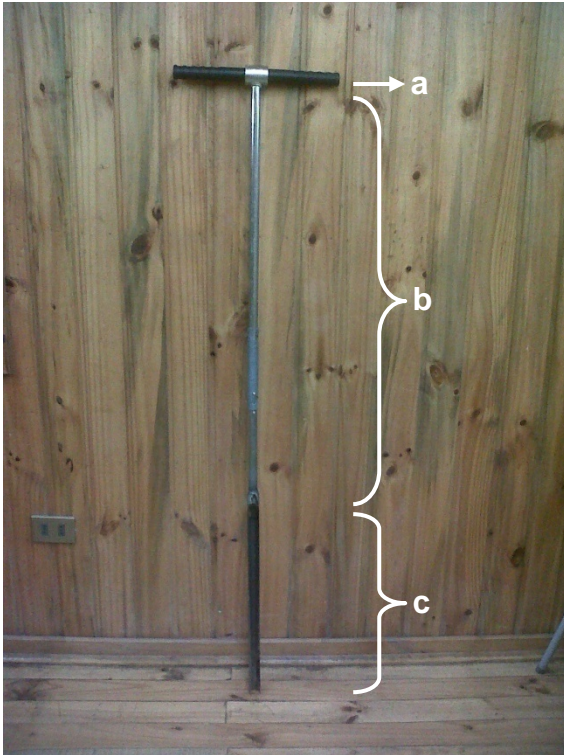
- Muestreo de suelos por cuadrícula y transeptos en las microcuencas
- Análisis global del suelo a través de calicatas y análisis de cartas<sup>63</sup>

<sup>63</sup> Las cartas usadas son de tres tipos: fotos aéreas; cartas IGM y ortofotocartas

#### 5.4.2.2.1. Creación de transectos y muestreo de suelos

El procedimiento para este punto contempla los siguientes pasos:

- a) Creación de transectos en las microcuencas mediante arcgis con una distancia de 100 metros entre uno en forma vertical y horizontal creando una grid x,y.
- b) Geolocalizar con GPS cada uno de los puntos generados en las intersecciones
- c) Muestrear en terreno. Este paso contempla las siguientes etapas:



**Figura 5.14. Bastón pedológico.** Conocido también como barreno agrológico, cuenta con un mango superior (a) un cuerpo (b) y la zona de penetración en el suelo con borde cóncavo para obtener la muestra.

- Localizar en terreno el punto mediante GPS
- Muestrear con el bastón pedológico en el punto obtenido. Esto se efectúa penetrando en bastón en el suelo lo más profundo posible, luego girar (a modo de barreno) y finalmente sacar el bastón con la muestra de suelo en su extremo inferior
  - Obtener una muestra de suelo en el punto geolocalizado.
  - Determinar la profundidad del suelo en centímetros.
  - Describir las características del entorno<sup>64</sup>. Para ello se consideran elementos como ladera o valle, exposición, altura de la vegetación, presencia de herbáceas, tipo de vegetación arbórea, etc...
  - Lo anterior se realiza con todos los puntos obtenidos en la grid.

- d) Trabajo en laboratorio: en esta etapa se procede mediante el software Arcgis a procesar la información obtenida en terreno. Para ello se ingresan los datos en el programa creando una matriz de profundidades de suelos en los layer de cada una de las microcuencas. Una vez procesada esta información se construyen los respectivos mapas de profundidad de suelos para las cuatro microcuencas.

<sup>64</sup> Un aspecto importante al considerar la profundidad del suelo son las características del entorno. Su descripción es necesaria porque de alguna manera ofrecen un referente acerca de la calidad del suelo, por ejemplo, los espinos altos (sobre los 3 metros) y robustos son un indicador de suelos relativamente profundos, el romerillo y el cardo son los primeros colonizadores de suelos degradados y el trébol coloniza rápidamente suelos quemados

#### 5.4.2.2.2. Construcción de calicatas y análisis del perfil del suelo

Uno de los criterios para elegir los lugares precisos para la construcción de las calicatas se establece en función del análisis obtenido de los transeptos (profundidad de suelos) y la información entregada por las cartas del lugar, las cuales son las siguientes:

- Carta IGM 1:25.000
- Ortofotocarta 1:25.000
- Carta aérea 1:20.000

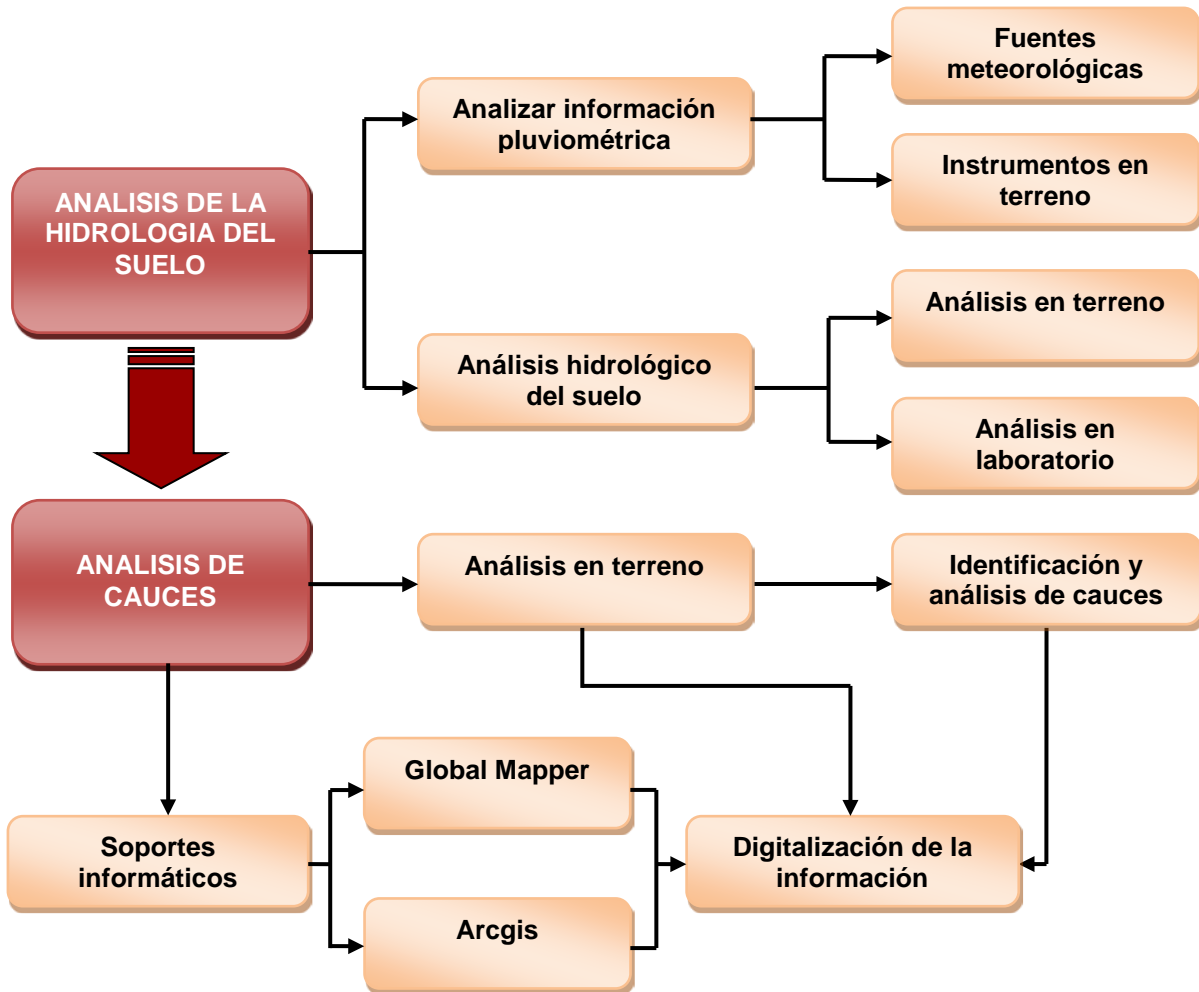
Aunque el criterio anterior es válido; otro elemento a considerar y el cual se considerará finalmente para la construcción de las calicatas será la altitud. Esto significa que se construirán 3 calicatas por microcuenca (12 en total); una en la parte alta, otra en la zona media y finalmente, la tercera en la zona baja de la microcuenca. Con esto se busca establecer una uniformidad en función de la topografía del terreno de Alto Loica. Una vez delimitada la geolocalización de los puntos en los cuales se construirán las calicatas se procede a la construcción de estas, con una profundidad promedio de 1,2 mt. Una vez construidas las calicatas (por microcuenca) se procede al análisis del perfil para generar posteriormente los mapas de suelos respectivos: Los parámetros de análisis de calicatas se establecen según la metodología descrita por Schlatter y colaboradores (2003):

PARAMETROS	SUBPARAMETROS
Limites	Forma y nitidez
Presencia de raíces	Contenido de raíces y tamaños
Estructura	Grano simple, masiva, granular, grumosa, poliédrica, subpoliédrica, prismática, columnar, laminar
Pedregocidad	
Profundidad	Fisiológica, efectiva
Color	Tabla Munsell
Densidad	aparente, real
material de origen	materiales transportados no consolidados, materiales transportados consolidados, materiales no transportados
Textura	
Consistencia	Suelo seco, suelo húmedo
Erosión	Ligera, moderada, severa, muy severa
Humedad	

**Tabla 7.12. Parámetros para el análisis de las calicatas.** Las calicatas se analizan con los 12 parámetros y subparámetros descritos, los cuales representan características particulares del sobre la estructura y conformación del suelo además de las características de los horizontes y la transición entre uno y otro. Elementos como la densidad, pedregocidad, consistencia, etc. son elementos claves a la hora de establecer planes de restauración, ya que, brindan información básica del suelo. El detalle de cada parámetro, así como su clasificación se describen en el anexo 5. Fuente: Elaboración Schlatter, et al, 2003.

### 5.4.2.3. Análisis hidrológico

El análisis hidrológico se estructura en dos grandes apartados: (a) hidrología del suelo y (b) Análisis de cauces. La metodología para ello contempla el análisis de las propiedades hidrológicas del suelo, trabajo en terreno identificando los cauces en las microcuencas, y finalmente, la digitalización de la información para la cuantificación de las propiedades de los cauces.



**Figura 5.15. Metodología para el análisis hidrológico de suelos.** En análisis hidrológico comprende inicialmente conocer las condiciones pluviométricas de Alto Loica para inferir su incidencia en las microcuencas y el levantamiento de la información con el instrumental instalado en terreno y luego efectuar el análisis hidrológico del suelo. Posteriormente se efectúa el análisis de los cauces, tanto su morfometría como las características de la red hídrica de las microcuencas. Fuente: Elaboración propia.

El análisis hidrológico contempla básicamente el comportamiento del agua en el suelo. Esta característica es fundamental para comprender los mecanismos adaptativos que la vegetación de Alto Loica tiene para sobrevivir a la época estival; esto, debido a lo marcado de las estaciones en las zonas de secano. Aspectos como infiltración, capacidad



de campo, etc. son elementos de primer orden para la implementación de planes de restauración y reforestación

#### 5.4.2.3.1. Hidrología de suelos

##### a) Drenaje

Consiste en la velocidad del movimiento del agua a través de escurrimiento superficial y percolación que permite eliminar el exceso de agua (Schlatter, et al, 2003). Se distinguen dos tipos de drenaje: externo e interno; el drenaje externo se define como la cantidad y velocidad relativa de agua que se mueve por escurrimiento sobre la superficie del suelo (Schlatter, et al, 2003). La clasificación del tipo de drenaje externo se efectúa en terreno con la tabla que se expone a continuación

Clase de drenaje	Características	Características de los terrenos
<b>Inundado</b>	El agua no escurre y debe moverse por infiltración o evaporación. Puede fluctuar en forma estacional o permanecer en forma permanente	Terrenos bajos, hundidos o deprimidos
<b>Muy lento</b>	El agua superficial escurre tan lentamente que hay agua empozada en la superficie periódicamente, por largos periodos (meses o semanas)	Terrenos en valles o llanuras planas o de pendiente muy reducida (< 0,5 %), donde converge el agua de sectores mas altos
<b>Lento</b>	El agua superficial escurre tan lentamente que hay agua empozada sobre el suelo periódicamente por períodos moderados a cortos (semanas a dias)	Terrenos planos sin pendientes natural para el desague o pendiente muy reducida (< 0,5 %).
<b>Moderado</b>	El agua superficial escurre en forma tal, que no se acumula agua libre en la superficie	Terrenos de pendiente suave a moderada (0,5 – 15%). La posibilidad de erosión puede ser ligera a moderada cuando se cultivan los suelos de esta clase
<b>Rápido</b>	El agua de precipitación se mueve rápidamente sobre la superficie del suelo. En general son terrenos de pendiente pronunciada	Terrenos de pendiente pronunciada (15 – 58%). La posibilidad de erosión fluctúa de moderada a alta
<b>Muy rapido</b>	La mayor parte del agua precipitada escurre rapidamente, dificultades en la infiltración	Terrenos con pendiente muy pronunciada (>58%). La posibilidad de erosión es muy alta.

**Tabla 5.13. Clases de drenaje externo del suelo.** Este tipo de drenaje incluye a las aguas que se desplazan o que escurren de sectores de mayor altitud y a las aguas provenientes de las lluvias (Schlatter, et al, 2003). La tabla muestra la clasificación utilizada para determinar el tipo de drenaje externo en los suelos de Alto Loica. Fuente: Schlatter, et al, 2003.

“El drenaje interno está determinado por la infiltración y percolación del agua en profundidad y/o en sentido de la pendiente. Se distingue por la frecuencia y la duración de los periodos de saturación con agua y depende de la textura, estructura y otras características del suelo” (Schlatter, et al, 2003).

Una de las características que se considera para determinar el drenaje (y que se consigna en la metodología presentada en la siguiente tabla) es el color del suelo (Schlatter, et al, 2003), sin embargo, no siempre se observa una relación restringida entre color y drenaje. Por ello –y para la identificación correcta de esta relación– Schlatter y colaboradores (2003) considera 4 elementos

- Origen del color
- Duración de las condiciones causales
- Características del suelo
- Topografía y vegetación.

Clase de drenaje	Características	Efectos en los vegetales
<b>Ninguno</b>	El agua libre no se mueve en el perfil del suelo. En regiones húmedas el nivel freático está en o muy próximo a la superficie. El suelo está permanentemente saturado con agua. En suelos pobres en materia orgánica es típica una coloración grisácea debido a los procesos de reducción; en suelos ricos en materia orgánica el color es muy oscuro a negro	Permite el crecimiento solo de especies adaptadas a condiciones de anegamiento permanente
<b>Muy lento o muy pobre</b>	Los horizontes pobres en materia orgánica presentan colores claros, generalmente grisáceos, producto de procesos de reducción; en horizontes ricos en materia orgánica el color es muy oscuro o negro. También son frecuentes las concreciones y los moteados. El suelo puede estar saturado con agua en la zona de las raíces por pocos meses o gran parte de al año. Este drenaje puede ser causado por un nivel freático alto, en el caso de la cercanía de un río, lago o simplemente por un horizonte poco permeable	El drenaje interno es demasiado lento para un crecimiento óptimo de los cultivos más importantes en las regiones húmedas e incluso en las regiones semiáridas. Son suelos que permiten solo especies adaptadas a una saturación prolongada del suelo

**Tabla 5.14. Clases de drenaje interno del suelo.** La tabla muestra los parámetros para determinar el drenaje interno del suelo. La medición del drenaje interno exigiría mecanismos de medición más complejos que implicaría el trabajo de calicatas en sectores específicos con mediciones puntuales. Sin embargo, el drenaje interno del suelo puede inferirse de acuerdo al comportamiento de la vegetación existente en un determinado lugar.. Fuente: Schlatter, et al, 2003.

Continuación tabla 5.14.

Clase de drenaje	Características	Efectos en los vegetales
<b>Lento, imperfecto o pobre</b>	Los horizontes pobres en materia orgánica presentan tonalidades grisáceas debido a procesos de reducción (gleyzación); presentan concreciones y moteados que indican la alternancia de periodos de saturación con agua y de aireación en el suelo. Muchos suelos con drenaje interno lento tienen niveles freáticos permanentes relativamente altos, o bien tienen un nivel freático fluctuante. La saturación con agua se mantiene por largos periodos, generalmente sobre dos semanas.	En drenaje interno es demasiado lento para un crecimiento óptimo de los cultivos más importantes de la región y permiten solo especies adaptadas a periodos prolongados de anegamiento en el suelo, siendo más favorable para éstas el agua en movimiento (más oxigenación)
<b>Moderado</b>	El suelo está libre de moteado y de concentraciones, especialmente en los horizontes A y B. La saturación con agua se limita a unos pocos días y no alcanza a dañar las raíces de las plantas de cultivo	Presenta condiciones óptimas para el crecimiento de los cultivos más importantes
<b>Rápido</b>	Suelo libre de moteados y concentraciones. La saturación del perfil con agua solo ocurre por algunas horas	El drenaje es tan rápido que puede afectar el crecimiento óptimo de la mayor parte de los cultivos de la región
<b>Muy rápido o excesivo</b>	No presentan moteados ni concentraciones. El movimiento del agua en el perfil es muy rápido debido a la porosidad gruesa. El suelo nunca está saturado con agua. El nivel freático se encuentra a varios metros de profundidad o no existe	Este drenaje es demasiado rápido para el crecimiento óptimo de los cultivos más importantes adaptados a la región

## b) Parámetros de la relación agua – suelo

En este apartado se explica la metodología para la cuantificación de la capacidad de agua aprovechable (CAA), la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP). Estos parámetros deben considerarse entre los más importantes con incidencia en la fertilidad (Schlatter, et al, 2003). Su cuantificación se efectúa en laboratorio con técnicas estandarizadas (Schlatter, et al, 2003), sin embargo, con parámetros como textura, materia orgánica y tablas estandarizadas se obtienen una adecuada estimación de sus valores (Anexo 4).

### Capacidad de agua aprovechable

Schlatter y colaboradores (2003) proponen las siguientes ecuaciones para la determinación de la CAA:

$$CAA(mm) = [CAA(\%) \times Es] - [(CAA(\%) \times Es) \times (\frac{Pd}{100})]$$

Donde

CAA(mm) : mm de agua aprovechable para las plantas

CAA (% vol)<sup>65</sup> : % de volumen del suelo

Es : espesor del suelo en dm

Pd<sup>66</sup> : Pedregocidad (%)

### Capacidad de campo

Este valor se estima por tablas estandarizadas previamente definidas por Schlatter y colaboradores (2003) en función de la textura y la densidad aparente

### Punto de marchitez permanente

Schlatter y colaboradores (2003) proponen la siguiente ecuación:

$$PMP = CC - CAA$$

#### 5.4.2.3.2. Metodología para el análisis de cauces

El análisis de los cauces y la red hídrica de una cuenca hidrográfica es fundamental para entender y conocer el comportamiento de ella. Por esto, el análisis de los cauces y de la red hidrográfica se efectuará con la cuantificación de 4 aspectos:

- Identificación de los órdenes de cauces
- Descripción del perfil longitudinal del cauce principal y el desarrollo de los modelos lógicos de la red hídrica de la microcuencas
- Análisis de la permanencia del cauce principal
- Identificación del tipo de erosión que afecta al cauce principal

#### a) Ordenes de cauces

La clasificación de Horton permite establecer la distribución de los tributarios y como estos contribuyen al cauce principal, permitiendo establecer características relativas a la torrencialidad de los cursos de agua presentes en la cuenca. Nania (2003) y Gómez (2002), proponen 4 parámetros que se obtienen a partir de la clasificación de Horton y que permiten un análisis más acabado y completo de la red de cauces de una cuenca. Estos son: relación de bifurcación, longitud total (por tipo de cauce tipo "i"), longitud promedio (por tipo de cauce tipo "i") y relación de longitud. La cuantificación de las longitudes de los cauces de una cuenca, es primordial para obtener datos que permitan conocer aspectos como crecidas, torrencialidad de cauces, etc... Los cuantificación de estos parámetros se obtiene con información digitalizada mediante Arcgis.

<sup>65</sup> Valor obtenido por tablas en función de la textura y la densidad aparente

<sup>66</sup> Este valor aplica el factor de corrección en función de la pedregocidad

Parámetro	Características y obtención
Clasificación de Horton	<p>Refleja el grado de ramificación de la red de drenaje (Nania, 2003). La clasificación de los cauces de una cuenca se realiza a través de las siguientes premisas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Los cauces de primer orden son los que no tienen tributarios.</li> <li>• Los cauces de segundo orden se forman en la unión de dos cauces de primer orden y, en general, los cauces de orden <math>n</math> se forman cuando dos cauces de orden <math>n-1</math> se unen.</li> <li>• Cuando un cauce se une con un cauce de orden mayor, el canal resultante hacia aguas abajo retiene el mayor de los órdenes.</li> <li>• El orden de la cuenca es el mismo del su cauce principal a la salida. (Nania, 2003)</li> </ul> <p>En relación al número de orden de los cauces, Horton encontró 3 leyes, llamadas Leyes de Horton: la ley de los números de cauces, la ley de las longitudes de los cauces y la ley de las áreas drenantes a los cauces. Dichas leyes dicen que la relación de bifurcación, la relación de longitud y la relación de áreas permanecen constantes de un orden a otro de una cuenca (Nania, 2003).</p>
Relación de bifurcación	<p>Se define como la relación entre el número <math>N_i</math> de cauces de orden "i" y el número <math>N_{i+1}</math> de cauces de orden "i+1", Horton encontró que esta relación es relativamente constante de un orden a otro (Gómez, 2003).</p> $Rb = \frac{N_i}{N_{i+1}}$ <p>Donde:  <math>N_i</math> : Cauce de orden i  <math>N_{i+1}</math> : Cauce de orden superior al cauce de tipo "i"</p>
Longitud total	<p>Consiste en la sumatoria de las longitudes de los cauces por tipo. De esta forma es factible conocer las extensiones de los cauces de orden "i" e "i+n" presentes en la cuenca (Gómez, 2003).</p>
Longitud promedio	<p>Consiste en el promedio de la sumatoria de las longitudes de los cauces por tipo. De esta forma es factible conocer el promedio de las extensiones de los cauces de orden "i" e "i+n" presentes en la cuenca (Gómez, 2003).</p>
Relación de longitud	<p>"Se define como la relación entre las longitudes promedio de cauces de ordenes sucesivos" (Gómez, 2003).</p> $Rl = \frac{L_{i+1}}{L_i}$ <p>Donde:  L: longitud promedio de los cauces de orden "i"</p>

**Tabla 5.15. Parámetros relativos a la hidrología de una cuenca.** Nania (2003) y Gómez (2003), proponen la metodología para la obtención de los parámetros relativos a la hidrología de una cuenca hidrográfica.

## b) Perfil longitudinal del cauce principal y modelos lógicos

Describe como el cauce principal cambia su altitud a lo largo de su recorrido en la cuenca hidrográfica, de tal forma que el perfil reflejará la pendiente en cada segmento determinada por las variables de la cuenca. Los modelos lógicos consisten en la presentación grafica de la red de cauces (que se obtiene por Arcgis) donde se distinguen los siguientes elementos:

- Conexión de cauces (unión de tributarios con otro cauce) identificando el nodo correspondiente.
- Identificación de cada uno de los cauces que conforman la red hidrica de las microcuencas.
- Clasificación de los cauces de la microcuenca según la denominacion de Horton.

Para los ultimos dos puntos mencionados, se establecerá una nueva metodología basada en la clasificación de Horton y el sistema de redes. La nomenclatura se especifica de la siguiente forma:

$$F^h_{1-x}$$

Donde:

F : Flujo

h : Tipo de cauce según la clasificación de Horton

1 : identifica al cauce principal, al que se denomina como cauce 1

x : número del cauce que tributa al cauce principal

## c) Permanencia de cauces

La escorrentía superficial en los cauces puede ser permanente y en algunos casos solo estar presente en ciertas épocas del año, por lo general en el primer caso ocurre con los cauces que son efluentes de cauces de mayor torrencialidad. La metodología para clasificar un cauce según su permanencia se detalla en la siguiente tabla:

Parámetro	Características
<b>Permanente</b>	Siempre tiene agua en movimiento, independiente de la estación del año. Por lo general, estos cauces son efluentes de cauces que tienen su origen en la Cordillera de los Andes
<b>Interrumpido</b>	Solo presenta cursos superficiales en determinadas estaciones del año, preferentemente en invierno o en primavera durante los deshielos cordilleranos.
<b>Efímero</b>	Cauces que presentan cursos de agua solo durante eventos pluviométricos,

**Tabla 5.16. Tabla para determinar la permanencia de un cauce.** La permanencia de un cauce hace alusión a la presencia de escurrimiento superficial en él. En algunos casos la presencia de agua en los cauces tiene como origen los eventos pluviométricos durante la temporada invernal, otros en cambio, son efluentes de cauces de mayor caudal provenientes de la Cordillera de los Andes. Fuente: Martínez, et al, 1996.

#### d) Erosión del cauce principal

La cuantificación de las características del cauce principal son esenciales para determinar el comportamiento de este y por ende, como influye en el comportamiento global de la cuenca debido a la importancia que este presenta. Aspectos como crecidas, arrastre de material, etc. son claves para la comprensión de fenómenos que subyacen a estos mecanismos. Por ello la erosión del cauce principal es un aspecto elemental en el trabajo de cuencas. Esta característica puede definirse o determinarse por los aspectos detallados en la siguiente tabla:

Parámetro	Características
<b>Erosión laminar</b>	Se produce por el arrastre de las partículas del fondo del cauce. Se produce cuando el cauce no presenta escorrentía; en los cauces interrumpidos es posible observarla durante la temporada estival.
<b>Socavación de fondo</b>	Corresponde a la disminución del fondo de un cauce, en otras palabras, es la profundización del nivel del fondo de un cauce que se origina producto del aumento del caudal de un cauce lo cual aumenta la energía cinética del agua aumentando con ello su potencial para erosionar. En los cauces interrumpidos puede observarse este fenómeno en el fondo del cauce.
<b>Socavación lateral</b>	Corresponde al desgaste de las paredes que conforman un cauce. En este caso no hay fijación de cubierta vegetal en las paredes del cauce.
<b>Socavación de riberas</b>	Corresponde a la erosión de las riberas de los ríos y cauces generadas principalmente durante las crecidas en los cauces en los cuales sus riberas han sido desarboladas y se les ha eliminado la protección vegetal

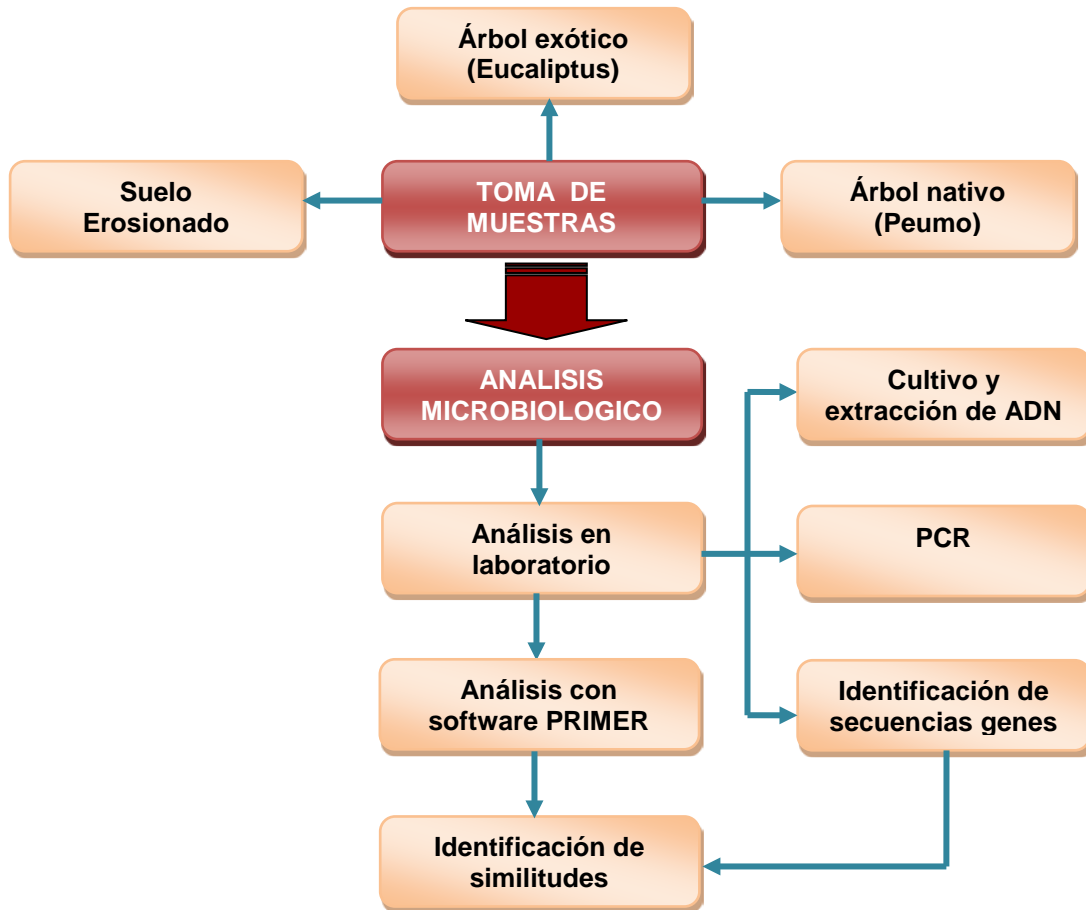
**Tabla 5.17. Parametros para determinar tipo de erosión que afecta al cauce principal.** Un cauce puede sufrir procesos erosivos de diferentes índole y por lo general depende las múltiples factores como pendiente, permanencia de la escorrentía superficial, topografía, crecidas, etc... Fuente: Martínez, et al, 1996.

#### 5.4.2.4. Análisis biológico

El análisis biológico tienen por fin analizar exclusivamente los microorganismos presentes en los suelos de Alto Loica (bacterias y hongos) excluyendo los multicelulares como anélidos, arácnidos, crustáceos, etc... De la misma forma, excluye todo análisis vegetal tanto fisiológica como taxonómicamente.

Dado que la actividad microbiológica está directamente relacionada con la vegetación presente (Madigan, et al, 2009), y para obtener una mayor representatividad de los microorganismos presentes en los suelos de las microcuencas; se obtendrán muestras de suelo de la rizósfera de árboles del sector; esto, debido a que los exudados de las raíces seleccionan comunidades microbianas específicas, lo cual, es un claro indicio de la importancia que los componentes químicos en el suelo tienen para el crecimiento y desarrollo microbiano. Dada la complejidad de estos compuestos y las sinergias que se generan con las variables interactuantes en el suelo, es muy difícil cultivar microorganismos del suelo en ambientes controlados (Kaebertein, et al, 2002). Para el

estudio microbiológico de los suelos de Alto loica (y para obtener una mayor representatividad de los resultados) se obtendrán muestras de la rizósfera de un árbol nativo, que en este caso es el Peumo (*Cryptocarya alba*), un arbol exótico representativo de Alto Loica que en este caso es el eucaliptus (*Eucaliptus cameldulensis*) y de suelo erosionado (sin vegetación) para establecer un patrón de comparación.



**Figura 5.16. Metodología para el análisis microbiológico de suelos.** Inicialmente se obtienen las muestras de suelo en la rizósfera de un árbol nativo, un árbol exótico y muestras de suelo erosionado para establecer patrones comparativos. Las muestras son analizadas en laboratorio mediante un PCR amplificando el ARNr 16S y posteriormente se efectúa el análisis con el software PRIMER para el análisis cuantitativo de los resultados. Fuente: Elaboración propia.

#### 5.4.2.4.1. Toma de muestras

Se obtendrán 5 muestras de la rizósfera de 2 árboles (Peumo y Eucaliptus) y 5 muestras de suelo erosionado, las 5 muestras de cada zona son para obtener una mayor uniformidad del sector de toma de muestras. En total, la metodología para la toma de muestra contempla un total de 15 muestras, las cuales, se analizarán en laboratorio para la determinación de las secuencias nucleotídicas que identifiquen familias bacterianas y fúngicas.



Inicialmente se determina el lugar de toma de muestras, en este caso, uno de los árboles elegidos. Se cava a una distancia de 10 cm del tronco hasta una profundidad de 10 cm, esto porque la gran mayoría de las bacterias se encuentran en los primeros 10 centímetros del suelo (McCaig, 2001) con esto se extraen aproximadamente 200 cc de suelo colocándose las muestras en bolsas especiales y previamente rotuladas con:

- Sector
- Árbol
- Número de muestra
- Fecha

Este proceso se repite alrededor del tronco para extraer en total 5 muestras (del mismo árbol) a una distancia de 72° una de otra. Estos pasos se repiten con el siguiente árbol (obteniendo 5 muestras mediante la misma metodología) y posteriormente se obtienen 5 muestras de suelo erosionado. Lo anterior, con el fin de obtener un patrón de comparación.



**Figura 5.17. Metodología para la toma de muestras en terreno.** La muestra para el análisis microbiológico se obtiene a una distancia de 10 cm del tronco del árbol excavando hasta un máximo de 10 cm. En negro se muestra la zona de la cual se obtiene la muestra. Fuente: McCaig, 2001.

#### 5.4.2.4.2. Análisis microbiológico de las muestras

El análisis microbiológico en laboratorio se obtiene en base a tres pasos lógicos y sucesivos:

- Extracción y cultivo de los microorganismos del suelo
- Extracción y purificación del ADN microbiano
- Aplicación del PCR

### *Extracción y purificación de los microorganismos del suelo*

Las muestras de suelo (15) se almacenan a 2 °C para conservar humedad y mantener la estabilidad microbiana<sup>67</sup>. Posterior a esto las muestras se homogeneizan manualmente una por una y de cada muestra se sacan 10 gramos de suelo para efectuar los análisis.

Para la extracción de los microorganismos se utilizará la metodología propuesta por Molano (2004). A 10 gramos de suelo de cada muestra se le agregan 90 ml de agua peptonada al 0,1 % en relación de 1:10, posteriormente se deja en reposo por 15 minutos realizándose diluciones de 1:10 iniciándose desde  $10^{-1}$  hasta  $10^{-7}$  en tubos con 9 ml de agua peptonada al 0,1 %.

De la última dilución (de todas las muestras) se obtienen 2 ml (Rodríguez, 2005) y se cultiva en un medio líquido (caldo de cultivo), obteniendo 15 cultivos rotulando cada uno de ellos. El caldo de cultivo se elabora según el siguiente protocolo<sup>68</sup>:

- Extracto de carne
- Peptona de carne
- NaCl
- Agua destilada
- pH: 7- 7.2

### *Extracción y purificación del ADN microbiano*

“La extracción de ADN consta de una etapa de lisis, que consiste en romper las estructuras que confinan el citoplasma y liberar al medio su contenido y otra de purificación, que implica la retirada de la solución final de la mayoría de elementos que pueden interferir en la PCR”<sup>69</sup>

Los pasos de la extracción del ADN son básicamente los siguientes: (a) lisis de la célula, (b) degradación de las proteínas que están asociadas al ADN y (c) purificación<sup>70</sup>.

Para la purificación del ADN se utilizara el kit Promega.

La metodología está basada en el siguiente protocolo<sup>71</sup>:

- De los medios de cultivo mezclar cada muestra con 600 Obtener 600µL de la solución de lisis con los amortiguadores y detergentes necesarios.
- Incubar a 80 °C por 10 minutos
- Añadir 3 µL de ARNasa

---

<sup>67</sup> Escuela de Geociencias. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín (ver bibliografía)

<sup>68</sup> Protocolo de la “Biblioteca Digital Nodomaterias” Universidad Nacional de San Luis, Argentina

<sup>69</sup> Newsletter Microbial. Universidad de Girona

<sup>70</sup> Iden

<sup>71</sup> Departamento de Biología (1). Facultad de ciencias, Universidad de Puerto Rico.

- Incubar a 37 °C por 15 minutos y dejar enfriar a temperatura ambiente
- Añadir 200 µL de solución para precipitación de proteínas y mezclar por vortex
- Incubar en hielo por 5 minutos
- Centrifugar a 13.00 rpm por 3 minutos
- Colocar el sobrenadante a un tubo y añadir 600 µL de isopropanol
- Centrifugar nuevamente a 13.000 rpm por 3 minutos y obtener el sobrenadante
- Colocar 600 µL de etanol al 70 %
- Centrifugar nuevamente a 13.000 rpm por 3 minutos
- Eliminar el etanol
- Rehidratar el pellet de DNA en 100 µL de solución de rehidratación (RS)
- Incubar a 65 °C por 30 minutos
- Para almacenar las muestras se efectúa a –20 °C<sup>72</sup>

### Aplicación del PCR

La PCR es una excelente herramienta de biología molecular para la discriminación de especies (Cienfuegos, et al, 2008). “PCR son las siglas en ingles de *Polymerase Chain Reaction* o Reacción en Cadena de la Polimerasa. La idea básica de la técnica es sintetizar muchas veces un pedazo o fragmento de ADN utilizando una polimerasa que puede trabajar a temperaturas muy elevadas. Cuando se hace una reacción de PCR se simula lo que sucede en una célula cuando se sintetiza el ADN y en el tubo se mezclan todos los ingredientes necesarios para hacerlo: la polimerasa, el ADN del organismo que se quiere estudiar –donde se encuentra el fragmento que se va a sintetizar– , los oligonucleótidos (llamados también *primers*, iniciadores, cebadores, “oligos”, etc.) necesarios para que se inicie la transcripción, dinucleotidos (dNTPs), y las condiciones para que la enzima trabaje adecuadamente” (Espinoza, 2007).

Los pasos elementales según la metodología de Espinoza (2007) para hacer el PCR son los siguientes:

- Descongelar las muestras (si es que están congeladas y a –20 °C)
- Preparar el kit con los elementos y las concentraciones del específicas (ver tabla ex)
- Añadir la muestra (se sugiere 49 µL de muestra y el ADN)
- Desnaturalización a 95 °C
- 30 ciclos de desnaturalización a 95 °C por 30 segundos
- Extensión final a 72 °C por 10 minutos
- Conservación de los tubos a 4 °C
- Para esto se considerará un cebador<sup>73</sup> para ARN 16S (Vasek, et al, 2013)
- Se purifica el PCR<sup>74</sup>

<sup>72</sup> Campus virtual “VirtualAulas”. Universidad del País Vasco

<sup>73</sup> Programa oficial de posgrado en microbiología Universidad Autónoma de Madrid

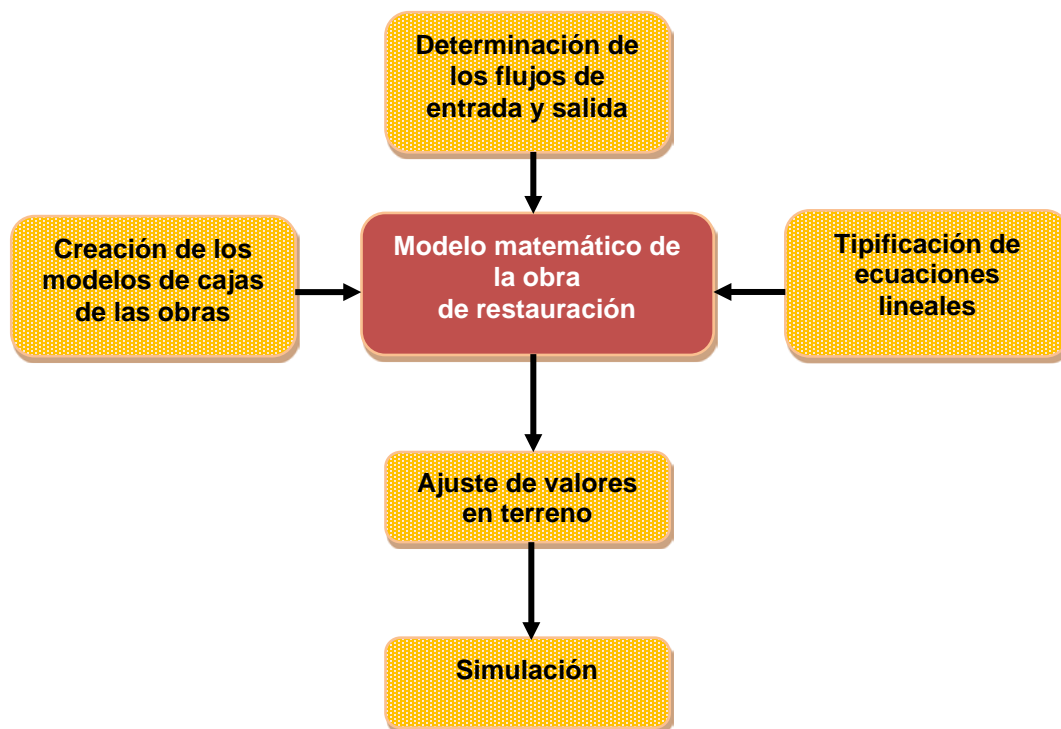
<sup>74</sup> Departamento de Biología (2). Facultad de ciencias, Universidad de Puerto Rico



La aplicación de la técnica del PCR permite establecer claramente diferencias genéticas entre una familia y otra por la diferenciación genética, la cual puede establecerse posteriormente mediante la aplicación de un RFLP. Los resultados del PCR se analizan posteriormente con el software PRIMER, estableciendo diferencias, cuantificando diferencias y pruebas estadísticas de diferenciación.

#### 5.4.3. DETERMINACIÓN DEL MODELO FENOMENOLÓGICO DE RESTAURACIÓN ECOLÓGICO – AMBIENTAL

El modelo fenomenológico consiste en un modelo matemático integro – diferencial diseñado para estimar el comportamiento de las obras hidrológico – forestales. En este caso puntual, se efectuará solo en base a zanjas de infiltración. El comportamiento del agua será la clave para el diseño de los modelos.



**Figura 5.19. Metodología para la determinación del modelo integro–diferencial de las zanjas de infiltración.** La determinación de los flujos de entrada y salida de agua es determinante para establecer matemáticamente el funcionamiento de las zanjas de infiltración. Por ello el primer paso consiste en la determinación de los flujos y su modelación mediante modelos de flujo de cajas para sistematizar las corrientes de entrada y salida de este sistema. Las ecuaciones lineales que determinan el comportamiento del agua en la obra es el paso previo al establecimiento de los modelos en base a esta información, para finalmente efectuar las simulaciones respectivas con la información recolectada en terreno. Fuente: Elaboración propia.

Para lo anterior se determinará mediante los siguientes pasos:

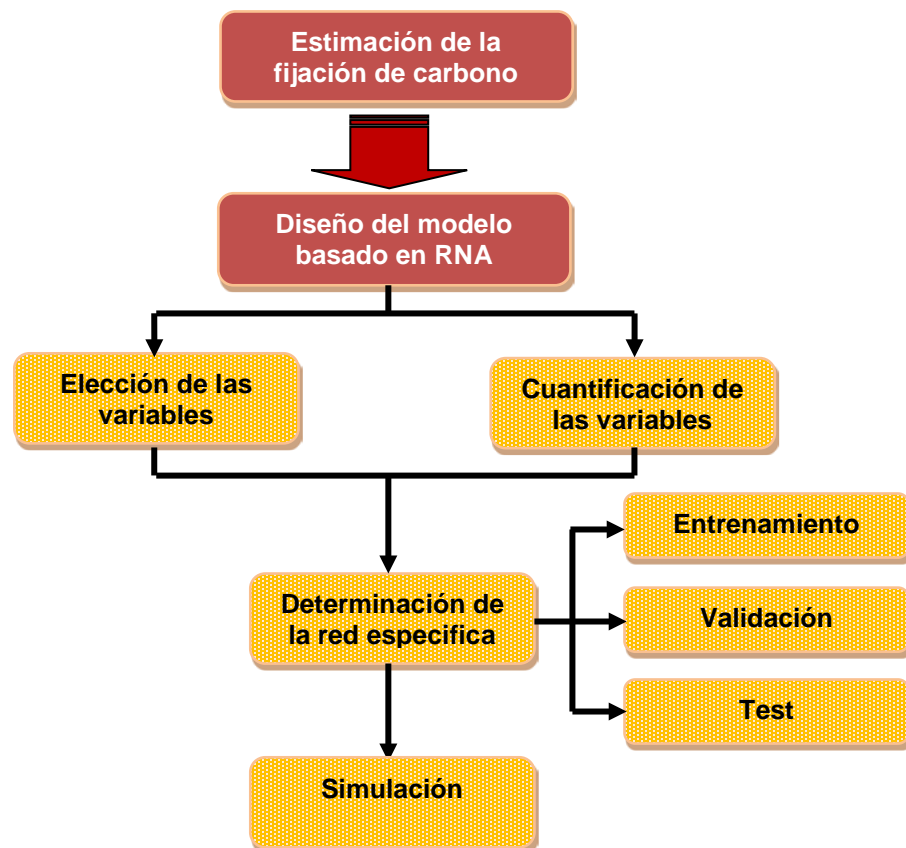
- Identificación de los flujos (corrientes de entrada y salida de agua) en las zanjas de infiltración.
- Creación de modelos de cajas para identificar las corrientes

- Adaptación de las ecuaciones a los flujos correspondientes
- Creación del modelo final en base a la estimación de los flujos cuando las obras se comporten como un sistema (zanjas de infiltración)

Las ecuaciones no serán, por lo tanto, estáticas. Básicamente serán de tipo integro-diferenciales, ya que, tendrán por objetivo determinar el comportamiento de la obra en cuanto a su interrelación con los flujos de agua.

#### 5.4.4. ESTIMACIÓN DE LA CAPTURA DE CARBONO ATMOSFÉRICO Y FORMULACION DEL MODELO DE REDES NEURONALES ARTIFICIALES

La creación del modelo para estimar el carbono captado en las microcuencas es la base fundamental del trabajo y se determina mediante fases lógicas y consecutivas para determinar el modelo final que servirá para estimar el carbono captado en la biomasa forestal de Alto Loica y en otros lugares –de la zona semiárida de Chile– donde el modelo sea replicable, solo cambiando el valor de las variables determinadas.



**Figura 5.20. Metodología para la determinación del carbono capturado y secuencia lógica para la creación de la red neuronal.** Para el diseño del modelo se propone un sistema de ajuste de parámetros basado en RNA. Inicialmente se determina la cantidad de carbono captado en función de las obras de restauración hidrológico – forestales, posteriormente se determinan las variables que más inciden en el proceso para, finalmente, escoger el modelo de red neuronal más adecuado a los requerimientos del trabajo. Fuente: Elaboración propia.

Inicialmente se plantea cuantificar el carbono en parcelas previamente definidas en las microcuencas de trabajo para posteriormente escoger las variables más significativas que inciden en el crecimiento de la biomasa. La cuantificación de dichas variables así como el peso de cada una, serán el paso previo para la definición de la red neuronal artificial más adecuada para el modelo planteado.

#### 5.4.4.1. Estimación de la fijación de carbono atmosférico en la biomasa forestal de las microcuencas

##### 5.4.4.1.1. Cálculo de la biomasa

Básicamente, existen dos métodos para determinar la biomasa arbórea: directo e indirecto. El primero es conocido normalmente como “destructivo” y es normalmente usado para la elaboración de ecuaciones alométricas y consiste en derribar y cortar más de un árbol para estimar la biomasa mediante indicadores específicos para posteriormente extrapolar los resultados. El segundo consiste en el uso de ecuaciones que relacionan dimensiones básicas obtenidas en mediciones de campo (Rügnitz, et al, 2009). Dado que el estudio se efectúa en un sitio de reforestación, es imposible recurrir al primer método por lo que se optará por el segundo



**Figura 5.21. Método de medición del DAT y el DAP.** La figura ilustra la forma de cuantificación de los parámetros para el método indirecto en el cual no hay destrucción de los árboles y solo se estiman variables en terreno: Captación propia.

La biomasa forestal se calcula mediante ecuaciones tipificadas en la bibliografía disponible, las cuales son específicas para determinadas especies calculándose en función de los parámetros definidos. Dado que las especies con las cuales se reforestaron

las cuencas al inicio del proyecto fueron eminentemente pinos y eucaliptus<sup>75</sup>, las ecuaciones alométricas utilizadas serán específicas para cada una de estas especies.

Para el cálculo de la biomasa de eucaliptus se utiliza la ecuación descrita por Álvarez y colaboradores (2005).

$$W = -12,9853 + 0,0355 \times d^2 \times H$$

Donde

W : Peso aéreo  
DAP : Diámetro del a la altura del pecho (cm)  
H : Altura en metros

Para la biomasa del pino, Navar y colaboradores (2001) proponen la siguiente ecuación:

$$B(t) = 1,2244 + 0,01298 \times DAP^2 \times Ht$$

Donde

B(t) : Biomasa total  
DAP : Diámetro del fuste a la altura del pecho  
Ht : Altura en metros

La bibliografía ofrece una gama amplia de ecuaciones alométricas tanto para diferentes especies, como para especies idénticas pero en distinto hábitat. Estos criterios también están condicionados con el potencial económico – forestal de las especies, diferenciando –por ejemplo– entre volumen total y volumen comercial (Moras y Vallejos-Barra, 2013). Lo anterior, implica que las diferentes funciones existentes en la actualidad están basadas en diferentes criterios y tipificaciones que se han extrapolado con parámetros aceptados pero en distintos países con condiciones económicas y bioclimáticas distintas lo que ofrece un amplia disponibilidad de funciones en la bibliografía. Sin embargo, la elección y utilización de estas funciones dependerá de múltiples factores. Al respecto, Rüginitz y colaboradores (2009) plantean criterios específicos para la elección de las funciones alométricas más adecuadas.

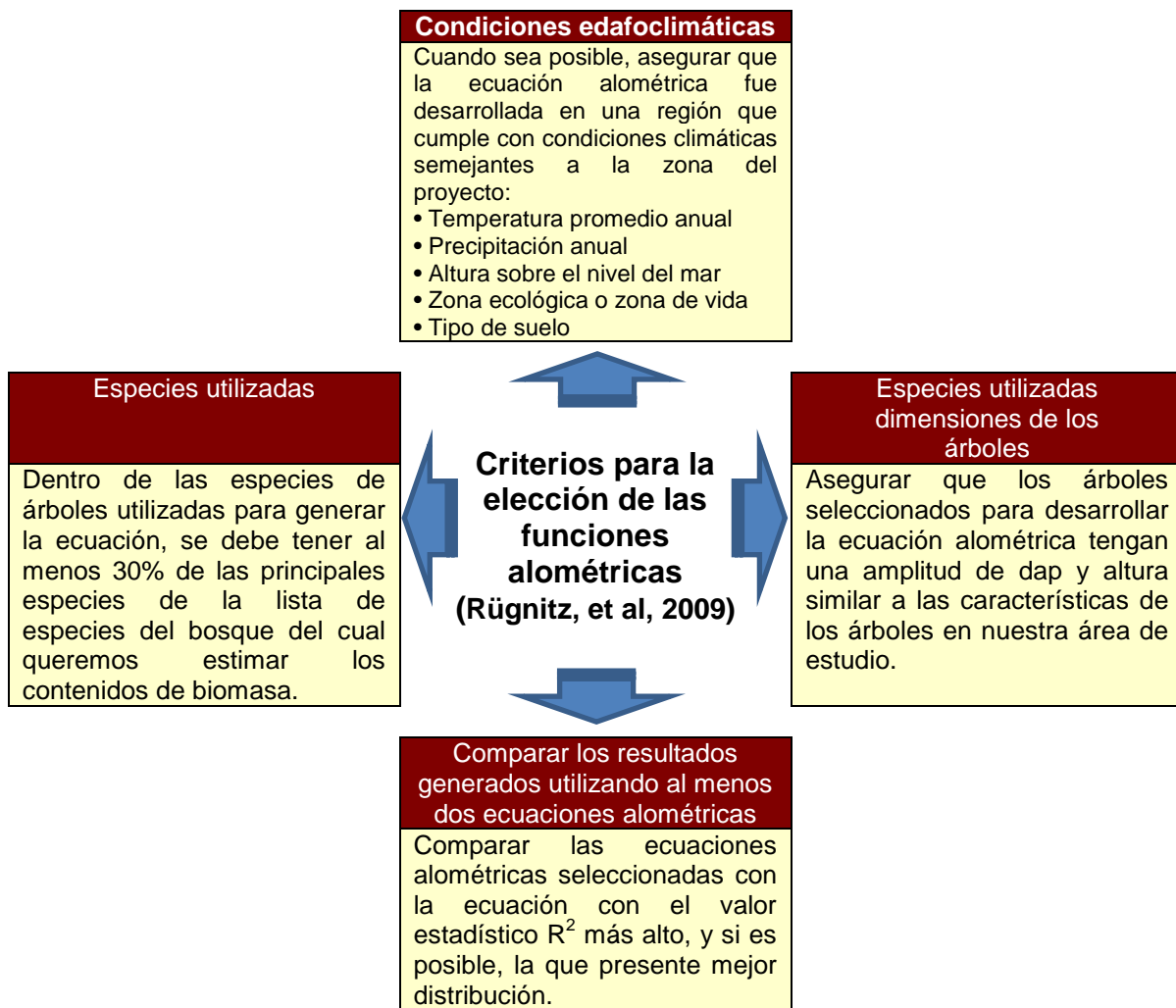
#### **5.4.4.1.2. Cálculo del carbono forestal**

La estimación del carbono capturado se efectúa considerando la información estimada en la biomasa debido a que se considera que la concentración de carbono en biomasa seca es del 50%. Debido a esto se considerará como carbono total fijado [Ct=Biomasa/2]. Esta estimación es aceptada debido a que se considera estable en ecosistemas de plantaciones y bosques (IPCC, 1996).

---

<sup>75</sup> El paradigma a inicios de los años 90 era la reforestación y detención del proceso erosivo mediante la reimplantación de una cubierta vegetal mediante las especies descritas, sin embargo, actualmente la prioridad es la plantación de bosque nativo con el fin de recobrar la flora autóctona de la zona central.

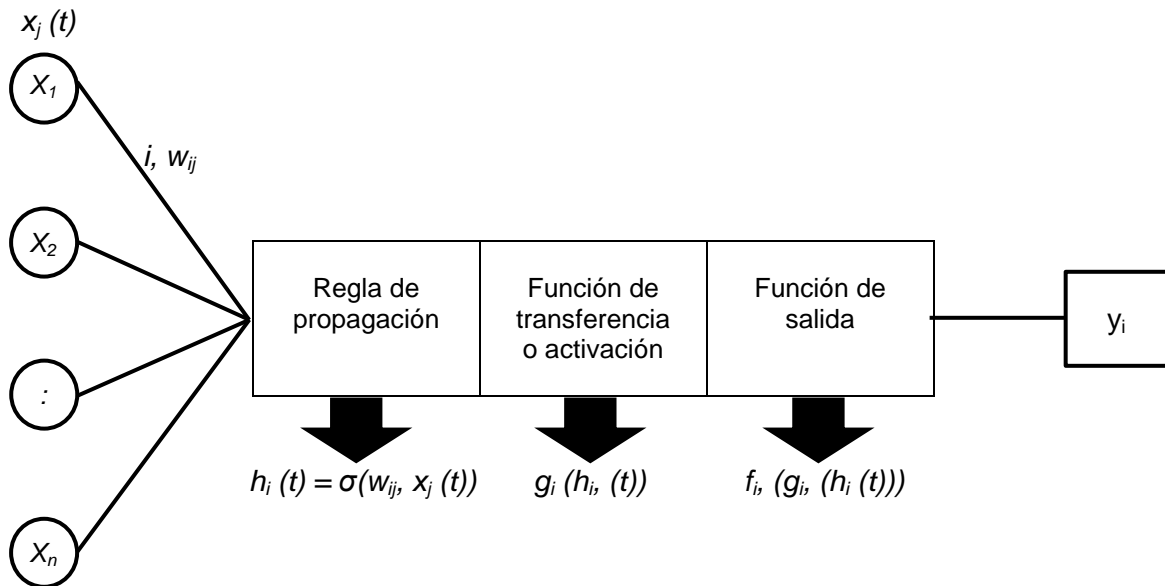




#### 5.4.4.2. Determinación del modelo basado en redes neuronales artificiales aplicado a la fijación de carbono atmosférico

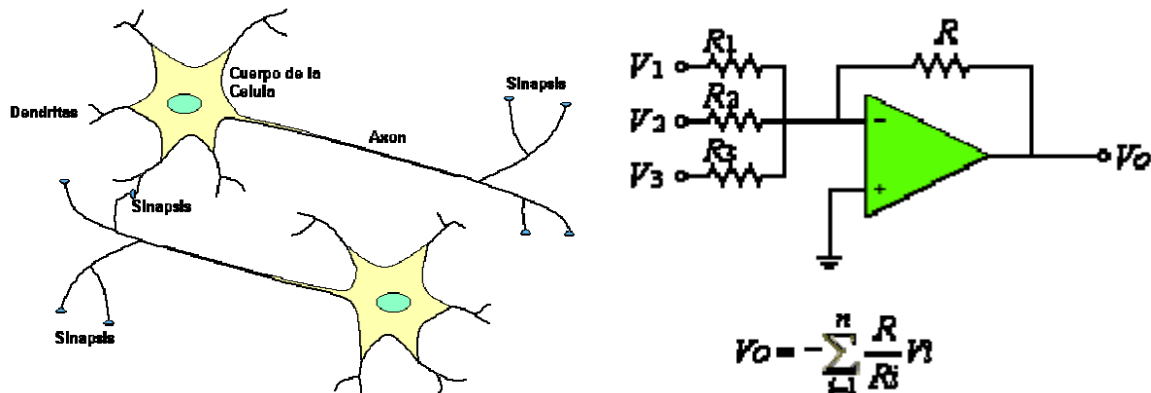
Las redes neuronales artificiales consisten en un mecanismo de ajuste de parámetros o una técnica de modelación matemática, que se basa en el proceso de aprendizaje que ocurre en el sistema nervioso de los organismos biológicos. Básicamente es una estructura constituida por neuronas conectadas entre sí y con la capacidad de recibir datos de entrada y generar una salida. (Ovando, et al, 2005). Los elementos básicos de una neurona artificial son:

- Un conjunto de entrada,  $x_j(t)$ .
- Los pesos sinápticos de las neuronas  $i$ ,  $w_{ij}$ .
- La regla de propagación,  $h_i(t) = \sigma(w_{ij}, x_j(t))$ .
- La función de activación o transferencia,  $g_i(h_i(t))$ .
- Finalmente la función de salida,  $f_i(g_i(h_i(t)))$ .

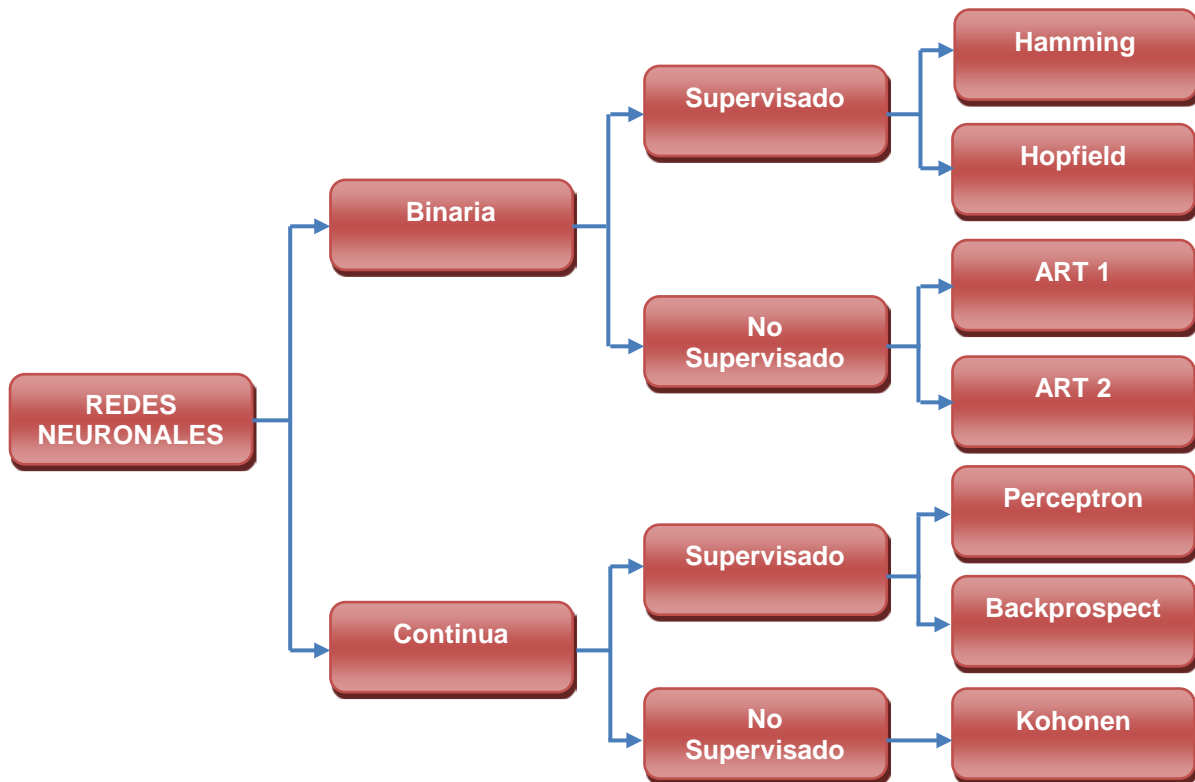


**Figura 5.22. Modelo genérico de una neurona artificial.** La entrada puede venir del exterior o de otras neuronas. Los pesos sinápticos representan la intensidad de la interacción entre la neurona presináptica y la postsináptica. La función de transferencia proporciona el valor del potencial postsináptico de la neurona  $i$  en función de sus pesos y entradas y la función de activación o transferencia,  $g_i(h_i(t))$  filtra el valor de la regla de propagación para compararse con algún valor umbral para determinar la salida final de la neurona. Fuente: Freeman y Skapura, 1993

Las redes neuronales artificiales es una técnica de estimación y clasificación que pertenece al área de la inteligencia artificial, que básicamente tiene como base el proceso de interacción y aprendizaje que intenta simular el funcionamiento del cerebro humano y especialmente la fisiología neuronal. Este sistema está constituido por capas de información, donde generalmente se puede distinguir una capa de entrada, una o varias capas intermedias u ocultas (que realizan la determinación de las relaciones entre las variables de entrada y salida) y una capa de salida (Mena y Montesinos, 2006).



**Figura 5.23. Neurona biológica y neurona artificial.** Todas las neuronas biológicas constituyen procesadores de información sencillos que tienen las mismas estructuras básicas aunque con diferencias estructurales según el tipo y actividad neuronal. Las estructuras básicas son el soma, axón, y dendritas, aunque la ubicación del soma neuronal varía en algunos tipos de neuronas la fisiología es idéntica en todas. El modelo de una neurona artificial es una imitación del proceso de una neurona biológica, donde la ponderación de las entradas genera una salida única ( $V_0$ ) que es el resultado de la energía de entrada.. Fuente: Acosta, 2000; Aguilar, 2008.



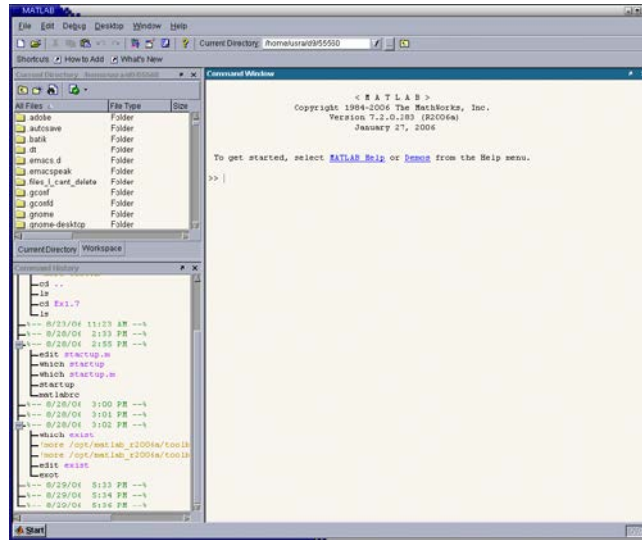
**Figura 5.24. Clasificación de las redes neuronales.** Las redes neuronales se pueden clasificar de diversas maneras, según su topología, forma de aprendizaje (supervisado o no supervisado), tipos de funciones de activación y valores de entrada (binarios o continuos). Fuente. Acosta, 2000

Acosta (2000) describe las siguientes observaciones del proceso biológico análogos con el sistema artificial que deben considerarse para la construcción de una red neuronal:

- Las entradas  $X_i$  representan las señales que provienen de otras neuronas y que son capturadas por las dendritas.
- Los pesos  $W_i$  son la intensidad de la sinapsis que conecta dos neuronas; tanto  $X_i$  como  $W_i$  son valores reales.
- $\Theta$  es la función umbral que la neurona debe superar para activarse; este proceso ocurre biológicamente en el cuerpo de la célula.

Las señales de entrada a una neurona artificial  $X_1, X_2, \dots, X_n$  son variables continuas en lugar de pulsos discretos, como se presentan en una neurona biológica. Cada señal de entrada pasa a través de una ganancia o peso, llamado peso sináptico o fortaleza de la conexión cuya función es análoga a la de la función sináptica de la neurona biológica (Acosta, 2000)

El modelo de redes neuronales artificiales se genera una vez realizada la recolección de datos en terreno. Esto se efectúa en las microcuencas de Alto Loica en las cuales se cuantifica la productividad vegetal en plantaciones eucaliptus usando variables topográficas y ambientales que definen la biomasa en cada parcela. Para tales efectos se utiliza en software matlab.



**Figura 5.25. Planilla básica de matlab.** El programa usado habitualmente en las actividades propias de la ingeniería, contienen los elementos (toolbox) elementos básicos para el trabajo de redes neuronales artificiales.

El ingreso de datos se efectúa en una red de tipo backpropagation, en la cual, el número de neuronas de la capa oculta se define, según Freeman y Skapura (1993), de la siguiente forma:

$$(NE \times NO) + (NO \times NS) \leq NC$$

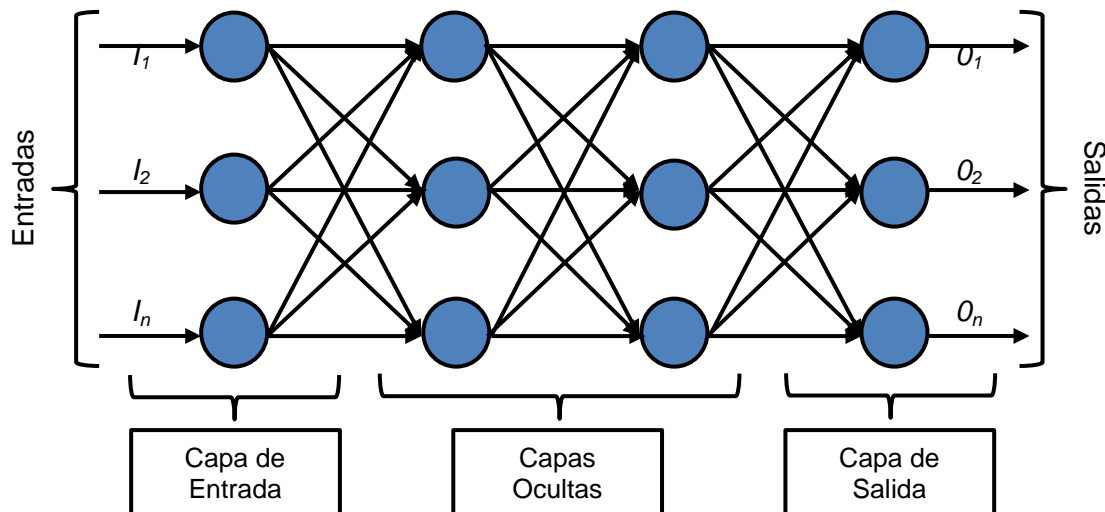
Dónde:

NE: Número de neuronas de la capa de entrada

NO: Número de neuronas de la capa oculta

NS: Número de neuronas de la capa de salida

NC: Número de casos



**Figura 5.26. Esquema de una red neuronal.** Está constituida por neuronas interconectadas y arregladas en tres capas (esto último puede variar). Los datos ingresan por medio de la capa de entrada, pasan a través de la capa oculta (que puede estar constituida por varias capas) y salen por la capa de salida Fuente: Salini, et al, 2006

Mena y Montecinos (2006), plantean el siguiente protocolo y validación para el desarrollo del modelo neuronal:

*a) Fase de entrenamiento.* Contempla la utilización del 45% de los datos levantados en terreno en las parcelas de carbono con el fin de estimar los pesos sinápticos de las conexiones. Se postula para esta fase el modelo backpropagation (figura 5.29) con capas de entrada, oculta y salida con solo una neurona en esta última correspondiente a la variable carbono fijado. El algoritmo empleado para el proceso de entrenamiento fue el de retropropagación del error, considerando una función de transferencia sigmoidea. Durante la fase de entrenamiento de la red, se determinan los pesos de las conexiones,  $w_{ji}$  que conectan a las neuronas de entrada con las de la capa oculta y  $w_j$  para la transferencia entre la capa oculta y la de salida. A partir de los datos de entrada la red en cada interacción propaga una salida, a través de las neuronas que la componen, con los pesos y función de transferencia considerada, esta salida se compara con la real, obteniéndose así un error. El entrenamiento concluye cuando la red es capaz de reproducir las salidas conocidas para los parámetros de entrada, con un error mínimo arbitrario. Las funciones de transferencia y activación utilizadas pueden ser de tipo lineal, escalón o sigmoidea (Ovando, et al, 2005)

*b) Fase de prueba.* Se utiliza un 10% de los datos restantes, con la finalidad de estimar el momento oportuno cuando el proceso de entrenamiento puede detenerse, definiendo posteriormente la matriz final de pesos sinápticos.

*c) Fase de validación.* La validación del modelo neuronal se efectúa una vez que el entrenamiento ha finalizado. El fin es medir la calidad del modelo y verificar si este puede generalizar los datos en el proceso de aprendizaje.

Posterior a la evaluación y validación de los modelos, este se implementa para determinar la importancia y peso de las variables ambientales en las microcuencas de trabajo.



---

## CAPITULO VI

# APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA CENTRADA EN LA FIJACIÓN DE CARBONO

---





Dado su descubrimiento relativamente reciente en Hispanoamérica (1536); el territorio chileno es rico en recursos naturales (mineros en la zona norte y forestales en la zona sur), lo cual, llevó a su población –desde tiempos coloniales– a satisfacer sus requerimientos en desmedro de los recursos que parecían infinitos. Su baja densidad poblacional<sup>76</sup> contribuyó a una falsa percepción que no solo estimuló, sino que retroalimentó este paradigma.

Lo anterior, es solo una de las tantas razones que pretenden explicar la rápida depredación hecha a los recursos naturales del país y el porqué de que las tasas de deforestación y erosión avancen más rápido que las tasas de restauración y reforestación. El modelo de desarrollo económico no han contribuido a acercar o invertir la correlación anterior; muy por el contrario, el aumento de la producción agrícola (traducida en la expansión del territorio cultivable y el aumento de la producción maderera) ha sido el eje rector desde la liberación de los mercados en los años 70 hasta el día de hoy<sup>77</sup>. La situación anterior ha sido muy marcada en los pequeños y medianos propietarios (muchos de ellos, herederos de la reforma agraria) que ven en los planes de restauración y conservación una amenaza directa a sus intereses y por ende, a sus ingresos<sup>78</sup>. En síntesis, el modelo de desarrollo no sostenible sumado a factores culturales, sociales y políticos han contribuido a la disminución de la productividad de las cuencas hidrográficas (Francke, et al, 2008)

Esto ha llevado a que los planes y técnicas de restauración no estén en los “clúster” del gobierno y solo sean elementos anexos que se han incorporado en políticas gubernamentales de desarrollo careciendo de una visión sistémica a largo plazo. En esto han intervenido (entre otros) elementos como: (a) la polisemia de conceptos y (b) la yuxtaposición de enfoques. Respecto a lo primero –por ejemplo– distintos entes visualizan diferentes concepciones para un mismo concepto; una muestra de esto último lo constituye la CONAF para quien, el concepto cuenca engloba a todos los elementos que están en ella (flora, fauna, humanos, infraestructura, cultura, etc...), sin embargo, para el Ministerio del medio Ambiente (MMA) y la DGA este concepto solo considera el elemento

---

<sup>76</sup> 4 millones de habitantes a inicios del siglo XX y 17 millones en la actualidad para un país de 700.000 Km<sup>2</sup> (Vial, 1981)

<sup>77</sup> Prueba de ello es que aun, el gobierno mantiene la vigencia del D701

<sup>78</sup> Esta situación se ejemplifica con los pequeños agricultores y ganaderos de la cuencas Claro y Coltahuco en la región de O'Higgins. Ellos no han implementado tareas de conservación debido a que las políticas planteadas por la autoridad central implican la reducción de sus producciones debido a la destinación de suelos para reforestación y recuperación de flora nativa. De la misma forma, la obtención de alimento para ganado doméstico (bovino y caprino) podría incrementar sus precios debido a la prohibición de obtenerlo de los cerros aledaños por el cuidado de la flora nativa.

hídrico. Bajo estas perspectivas, es difícil consensuar planes que tengan un solo fin, es decir, planes con un origen basado en directrices diferentes terminan finalmente contraponiéndose. En lo relativo al segundo aspecto, la consecuencia es doble: la interdisciplinariedad respecto de un mismo objeto de investigación (cuencas, restauración, etc...) puede establecer nociones diferentes según una ciencia específica y en segundo lugar, el enfoque escogido puede llevar a distintas visiones cada una con un dogmatismo propio que establezca sus límites y objetivos muchas veces irreconciliables entre si, por ejemplo, la restauración puede estar enfocada únicamente en los elementos naturales desde una mirada biologicista amparada al alero de la ecología radical, en cambio, una mirada política buscaría la obtención de un valor agregado (generalmente económico) cuyo fin último sería la satisfacción humana a través de la obtención de bienes y servicios.

En síntesis, lo anterior denota a muy grandes rasgos tres carencias básicas de los planes y propuestas de restauración ambiental: (a) la falta de una visión holística a nivel país en materia de restauración y conservación de los recursos naturales<sup>79</sup>, (b) la multiplicidad de criterios y enfoques entre distintos entes no existiendo sintonía entre los planes de restauración y rehabilitación ambiental dados los distintos intereses de cada entidad y (c) falta de una visión transdisciplinaria en las estrategias descritas en (b).

En el presente capítulo, se pretende dar una aproximación en este último punto aportando con una propuesta cuyo fin es establecer desde diferentes ejes disciplinarios, una metodología cuya “columna vertebral” es propia de las ciencias de la ingeniería como es la “ingeniería de requerimientos”, que a su vez, se nutre con los aportes de otras disciplinas tales como la ecología, geografía, microbiología, hidrología y edafología entre otras. Por ejemplo, los distintos planes llevados a cabo por la CONAF contemplan la forestación con el fin de disminuir la erosión y aumentar la cobertura vegetal, pero ninguno de sus planes han estudiado la incidencia del aspecto microbiológico en la recuperación de suelos degradados. La estructuración de la aplicación metodológica está dada por pasos claramente tipificados y sistematizados en cada etapa, para dar lugar a una propuesta que nacida para problemas de ingeniería, resulta ser aplicable a las ciencias emanadas de la biología. La primera parte define claramente la situación inicial de las microcuencas y el perfil objetivo del trabajo de investigación, terminando por definir las alternativas de solución, elección e implementación de ella. Aunque los dispositivos de restauración se instalaron al comienzo del proyecto CONAF – JICA a inicios de los 90, el aporte real implica la implementación de una metodología que pueda ser aplicada a otros escenarios y en este caso puntual relaciona la efectividad de las obras con la captura de carbono centrada en la producción de biomasa. Aunque la metodología se ha adaptado al escenario de Alto Loica, hay diferencias con la forma en que la ingeniería de requerimientos se presenta habitualmente en la bibliografía. Los aspectos básicos en lo que respecta al levantamiento de información generalmente asumen formas más cercanas a las ciencias sociales, mientras que la información aquí presentada se ha levantado con instrumentos propios de las ciencias naturales y geográficas. A grandes rasgos, la aplicación de la metodología se ha efectuado siguiendo el procedimiento de extracción en la cual se ha delimitado la información existente al inicio del proyecto basado principalmente en la situación en que estaban las microcuencas en 1990. El

---

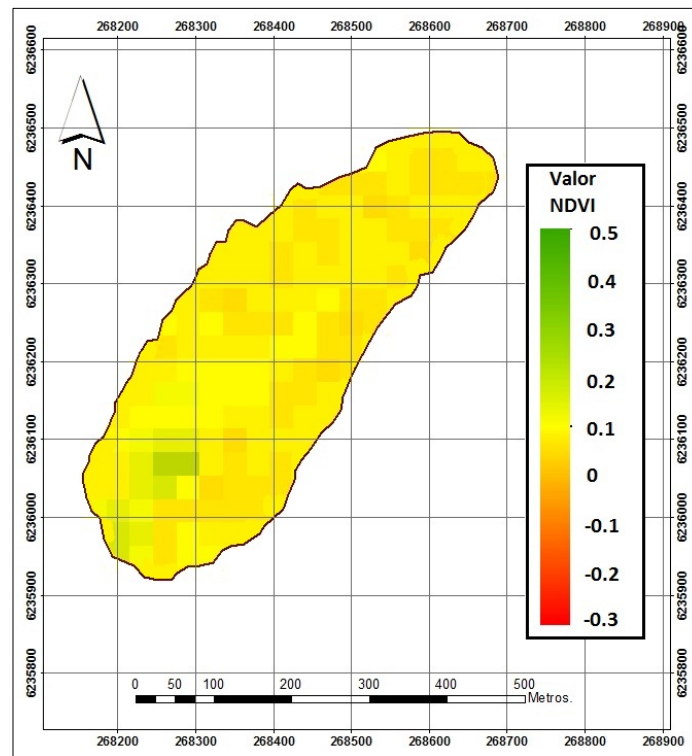
<sup>79</sup> A pesar que Chile es conocido en Latinoamérica por sus extensas plantaciones forestales, no hay planes concretos a nivel de gobierno en lo que respecta a una política ambiental. Las multas a empresas contaminantes es baja, las empresas que más emanaciones generan son del Estado y por lo tanto no son multadas. Los planes de ordenamiento territorial no son vinculantes y Chile destina menos de un dólar por hectárea a la conservación de parques y zonas protegidas.

análisis y la especificación describen los pasos respecto a la forma y el fondo en que surge la solución al problema planteado.

## 6.1. EXTRACCION

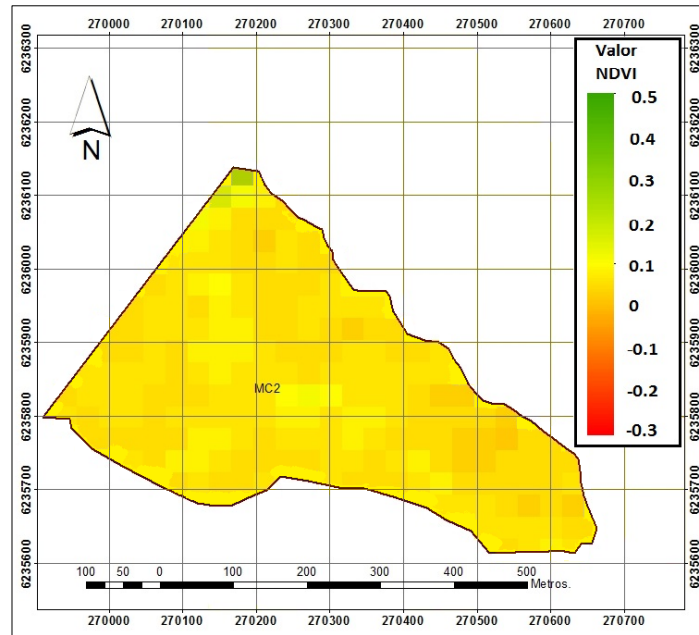
### 6.1.1. Situación inicial de las microcuencas en la etapa de preintervención

La zona de estudio en Alto Loica registró una fuerte actividad agraria durante décadas; al ser San Pedro de Melipilla una comuna (hasta hoy) eminentemente rural y con habitantes de bajos recursos (básicamente pequeños propietarios agrícolas y ganaderos), la explotación de los recursos naturales resultó ser –para los habitantes del sector– una fuente (casi) inagotable de bienes y servicios que permitieron su subsistencia desde tiempos coloniales. Sin embargo, las consecuencias de dicha acción –sin planes de manejo ni restitución de los recursos utilizados– llevaron a la deforestación casi total de la zona produciendo una fuerte erosión en los suelos. El análisis de las imágenes satelitales de 1990, demostró que los suelos de Alto Loica, tenían un alto grado de erosión y la vegetación en el lugar era prácticamente inexistente en una zona que había tenido grandes extensiones de bosque esclerófilo. El análisis del NDVI<sup>80</sup> en la microcuenca 1 (0,1) indica que en 1990 la vegetación era prácticamente inexistente, los suelos estaban desnudos y con un alto grado de erosión.

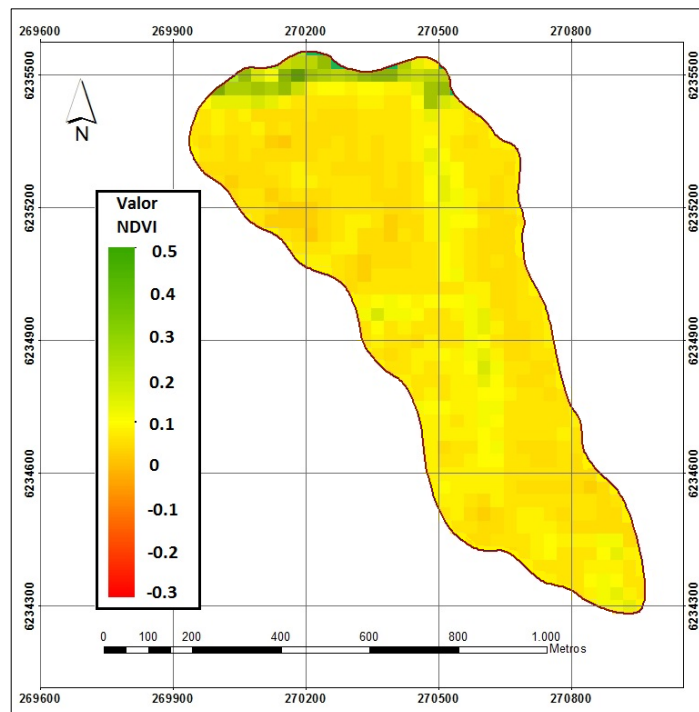


**Figura 6.1. NDVI de la microcuenca 1, año 1990.** En 1990 el proyecto aún no implementaba, por lo que la imagen muestra el estado real que tenía la microcuenca producto de las malas prácticas humanas y la intervención a la que había sido sometida la microcuenca; su NDVI de 0,1 muestra un suelo fuertemente erosionado. Fuente: Elaboración propia.

<sup>80</sup> El NDVI fluctúa entre 1 y -1. Toma en valor 1 en presencia de vegetación abundante y robusta y -1 cuando la vegetación es inexistente, por ejemplo una ciudad con alto grado de urbanización y sin vegetación.



**Figura 6.2. NDVI de la microcuenca 2, año 1990.** La microcuenca exhibía en 1990, un alto grado de deterioro ambiental producto de las intervenciones a las que había sido sometida durante décadas de explotación sin ningún plan de manejo. Su NDVI de 0,1 (app) muestra que la vegetación es inexistente en un lugar donde hubo grandes extensiones de bosque nativo. Fuente: Elaboración propia.

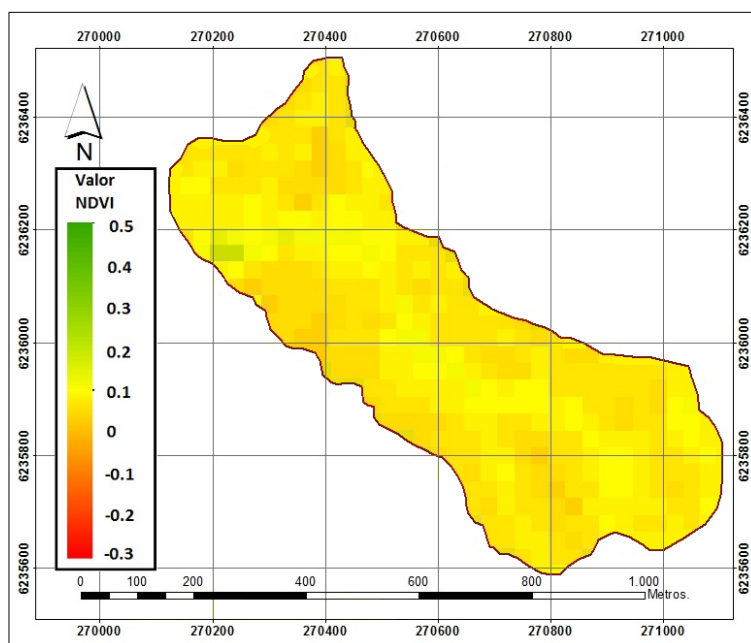


**Figura 6.3. NDVI de la microcuenca 3, año 1990.** La microcuenca 3 muestra los resultados de décadas de explotación antes de la implementación del proyecto; salvo excepciones puede mostrarse una pequeña zona vegetacional en la zona norte la microcuenca. El suelo está desnudo de vegetación en casi toda la microcuenca. Fuente. Elaboración propia.

Al igual que la microcuenca 1, las microcuencas 2 y 3 mostraron el año 1990 un alto grado de deterioro que se evidencia por la inexistencia de vegetación, lo cual, influyó en el deterioro paulatino del suelo evidenciando una erosión calificada como muy severa. El análisis del NDVI denota la ausencia de masa vegetal; y debido a que es una zona rural los valores son superiores a cero.

La microcuenca 2 evidencia una zona altamente erosionada y carente de vegetación; o si está presente, solo se reduce a pequeñas formaciones que no son suficientes para atenuar el impacto de la gota de lluvia y evitar la erosión; de la misma forma es absolutamente incapaz de evitar la pérdida de suelo, debido a que se necesita vegetación más abundante para detener la acción de la escorrentía superficial en las temporadas invernales. En la microcuenca 3, se puede observar una masa vegetal en la zona norte (lo cual es coincidente con la zona más baja de la microcuenca); esto presumiblemente por la cercanía a un cauce, el escurrimiento de las zonas superiores y la acumulación de agua proveniente de las temporadas invernales.

En síntesis, la situación inicial de las microcuencas en el año 1990<sup>81</sup>, evidencia un lugar altamente deteriorado y carente de vegetación con un alto grado de erosión. Esta situación implica un cambio radical a su situación original debido a que en la zona hay vestigios (o trazas) de bosque esclerófilo que alguna vez estuvo presente en el sector. Las figuras 6.1 a la 6.4 indican el estado de las microcuencas antes de la implementación del proyecto CONAF – JICA. La microcuenca 4 (o testigo) muestra las mismas condiciones que las microcuencas 1, 2 y 3; es decir, un alto deterioro y carencia de vegetación con un alto grado de erosión.



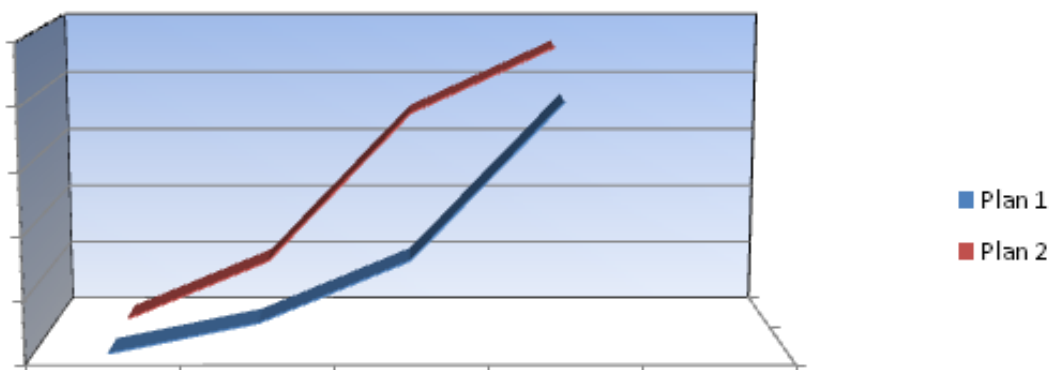
**Figura 6.4. NDVI de la microcuenca 4, año 1990.** La microcuenca 4, no difiere grandemente de las microcuencas anteriores; su valor de 0,1 indica la inexistencia de vegetación autóctona; el suelo está desnudo con un alto grado de erosión. Fuente: Elaboración propia.

<sup>81</sup> Se consideró este año como punto de inicio del análisis, debido a que se debía establecer la situación de las microcuencas antes de la implementación del proyecto (1993); debido a ello, la situación que se muestra representa la situación que existía en Alto Loica antes que comenzaran las tareas de restauración.

### 6.1.2. Perfil objetivo

El sector de Alto Loica fue altamente intervenido por la acción antrópica en los últimos años generando una disminución de la cobertura vegetal, grados de erosión y disminución de la biodiversidad lo que generó que los suelos perdieran su capacidad de generar bienes y servicios. Esto último dio lugar a distintos estilos de intervención<sup>82</sup> y formas de entender la problemática que la acción humana produjo en ese sector.

Sin embargo, la aplicación de estrategias de intervención en el área debe estar en función de las necesidades de la zona o abocada a la tarea específica que persiguen los planes de acción. En base a esto, el establecimiento en base a un perfil basado solo en la proyección lineal de los indicadores tendrá como resultado final (en la mayoría de los casos) una solución reduccionista; en cambio, un imagen final basada en lo deseado (considerando la acción de todos los actores) lleva a soluciones sistémicas.



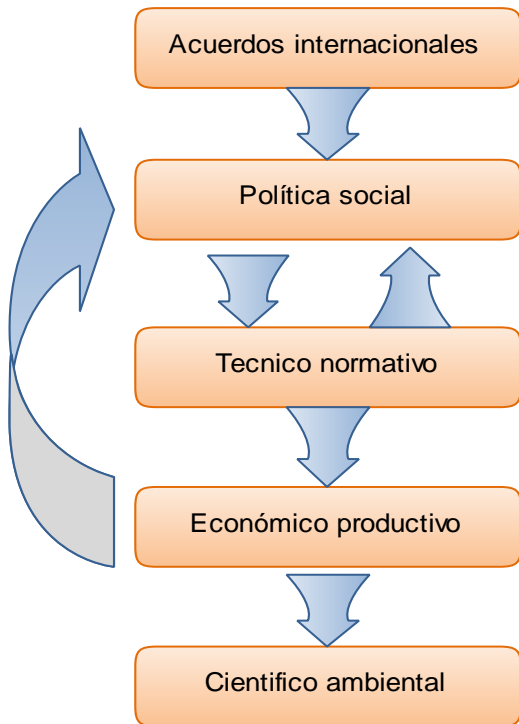
**Figura 6.5. Diferentes planes según objetivo final.** La objetivo se estructura en función de la imagen final que se desea al final de la restauración. Ciertos planes (plan 1) se efectúan solo en función del comportamiento de las variables que condicionan el plan, en cambio, la forma óptima de trabajo radica en la creación de planes de restauración (plan 2) basados en una imagen deseada al final del proceso. De esta forma al final del plan 1 se obtiene un resultado basado solo en la sistematización de las variables que controlan el proceso, en cambio, al final del plan 2 se obtiene una imagen – producto basado en un óptimo deseado llevado a cabo mediante una ordenación integral y sistémica. Esto genera como resultado una disparidad entre lo “real” (plan 1) y lo “deseado” (plan 2). Fuente: Elaboración propia.

En base a lo anterior y tomando como eje central la gestión de cuencas, la estructuración del trabajo toma un marco centrado en las acciones “recuperativas” de la gestión ambiental, considerando un fin netamente centrado en los servicios ecosistémicos de las microcuencas. Para ello es necesario establecer los planes y las estrategias aplicables a este fin y no considerando factores productivos o económicos en forma inmediata. Esto significa que el perfil del proyecto está centrado en un fin académico e investigativo.

Tomando como eje del trabajo la gestión de cuencas hidrográficas, Dourojeanni (2011), divide esto último en cuatro niveles de gestión:

<sup>82</sup>Muchas de estas intervenciones fueron hechas por organismos gubernamentales (como municipios, CORFO, etc.) e internacionales (FAO). Otras se efectuaron a través de organismos que realizaron investigaciones y planes de manejo en el área (CONAF y universidades nacionales y extranjeras)-

- a) *Científico ambiental*: se estudia la cuenca como sitio de estudio (centro de experimentación en terreno)
- b) *Económico productivo*: analiza los elementos productivos y económicos de la cuenca. Estilo basado en los recursos naturales de la cuenca
- c) *Técnico normativo*: nivel de los ministerios. Básicamente todo lo que significa la aplicación de leyes y decretos relativos a las cuencas
- d) *Político social*: empieza en el congreso y los movimientos sociales y sindicales.



**Figura 6.6. Jerarquía de niveles de la gestión en cuencas.** La gestión por cuencas comienza primeramente por los acuerdos internacionales generándose una retroalimentación entre los dos niveles inferiores a este. Sin embargo se genera una presión desde el nivel económico productivo al político social, quedando el nivel científico ambiental en último lugar, a pesar de la importancia de este último. De esta manera, la dinámica global de la gestión de cuencas se ha basado básicamente en fines económico productivos primando sobre los criterios científicos Fuente: Dourojeanni, 2011.

Considerando estos 4 aspectos como parámetros o niveles básicos de los cuales se enmarca la gestión de cuencas hidrográficas, la investigación aquí presentada se considera con un perfil marcadamente “científico ambiental”. Esto porque las microcuencas del sector Alto Loica, solo están consideradas como microcuencas experimentales<sup>83</sup>, en las cuales, se pretende mediante obras de restauración hidrológico forestal (acompañadas con procesos de biotecnias y reforestación) disminuir la superficie erosionada y aumentar la cobertura vegetal con el fin de maximizar la fijación de carbono atmosférico.

Básicamente en sus inicios, el proyecto inicial contemplaba el empleo de obras de restauración para disminuir tanto el avance de la erosión, como las superficies erosionadas y aumentar la vegetación, con la finalidad de aplicar dichas obras a otros lugares con problemas similares y –mediante el uso de esta tecnología– hacer frente a uno de los más graves problemas de suelos en Chile (ver prólogo)

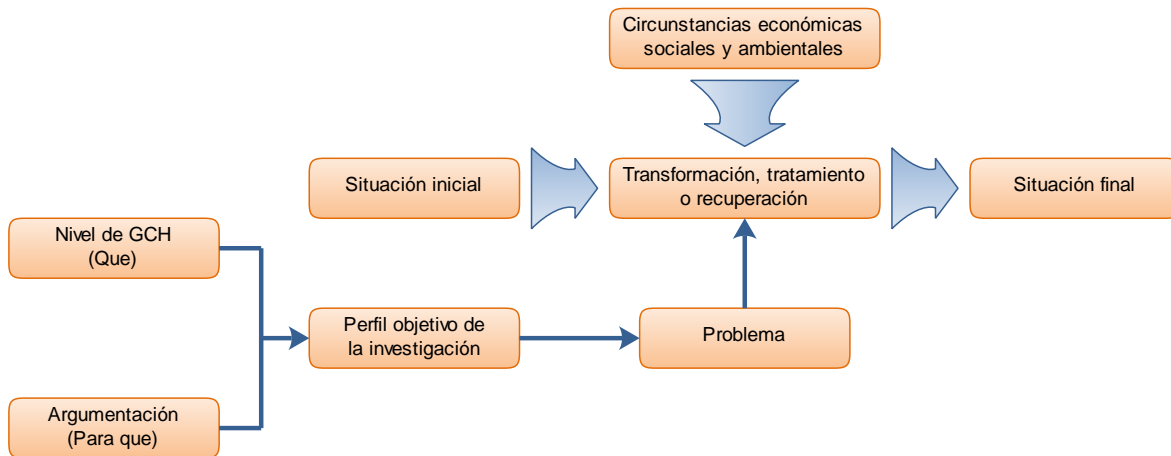
Sin embargo, el perfil actual mantiene parte de la esencia del proyecto original al considerar como eje básico un fin científico ambiental, aunque, esta vez considera el aumento de la cobertura como elemento básico para maximizar la fijación de carbono atmosférico. Es por tanto en este punto donde está centrada la problemática y eje central de la investigación. Esto significa que la restauración ambiental con el consiguiente aumento de la cobertura y biomasa vegetal no está considerada para fines de uso humano, abastecimiento de recursos, uso animal, fines paisajísticos ni nada que

<sup>83</sup> Técnicamente hablando son un gran laboratorio al aire libre



considere específicamente el uso estrictamente humano de los recursos vegetales existentes en las microcuencas. Sin embargo y a pesar de tener fines académicos, hay argumentaciones que justifican la restauración, Gómez (2004), menciona las siguientes:

- a) *Imagen*: un espacio degradado ofrece una imagen deplorable de los agentes implicados en la degradación (causantes directos, autoridades responsables y población afectada).
- b) *Calidad de la gestión*: un espacio degradado denuncia desidia e insensibilidad por la calidad en general y la ambiental en particular, desanimando a posibles inversores.
- c) *Factor de localización de actividades económicas de vanguardia*: un espacio ambientalmente valioso atrae la localización de aquellas actividades que con poca cantidad de materia prima y utilizando mano de obra muy calificada obtienen un elevado uso añadido.
- d) *Componente de la calidad de vida para la población*: la calidad ambiental es un componente importante de la calidad de vida.
- e) *Compensación de impactos imposibles de evitar o mitigar*.



**Figura 6.7. Localización del perfil objetivo en investigaciones de transformación de un espacio degradado.** La transformación que se efectúe en un lugar va a estar condicionada por las circunstancias económicas, sociales y ambientales que influyan en los procesos de restauración y en función de estos últimos se obtendrá la situación final, aunque, la identificación del problema es clave para identificar las tareas específicas que se deben realizar. El problema debe a su vez estar delimitado por el perfil que tenga la investigación. El perfil objetivo consta de dos elementos: “que se hará”, en este caso indicando el nivel de gestión de cuencas hidrográficas (GCH) y el “para que se hará”, lo cual argumenta el paso anterior. Fuente: Elaboración propia.

La investigación no está centrada en ninguna de las líneas antes expuestas que argumenten o justifiquen la restauración ambiental centrada meramente en fines antrópicos. Las circunstancias son diferentes, aunque, se persigue que los elementos aquí descritos puedan ser usados para futuros estudios de captura de carbono, principalmente en investigaciones relacionadas principalmente con estudios que busquen



alternativas de solución, o mitigación para los problemas derivados del cambio climático<sup>84</sup> y el aumento de los gases invernaderos.

## 6.2. ANÁLISIS

### 6.2.1. Problemática

El sector de Alto Loica fue muy utilizado (según palabras de los lugareños) durante años para lugar de explotación de recursos sin mediar ningún plan de manejo. Entre las actividades más comunes estaban la ganadería (bovina, ovina y caprina) y la utilización de madera usada como combustible y para la fabricación de carbón. La pérdida de la masa vegetal hizo que los suelos perdieran paulatinamente su protección quedando a merced de la erosión eólica e hídrica. De esta forma en los últimos 20 años los suelos del lugar quedaron degradados, con un alto grado de erosión y con pérdida de masa vegetal restringiéndose está a espinos, romerillo, boldos y litres (Trivelli, 2006)

Para evitar el aumento de la erosión y poder recuperar vegetación y masa arbórea se hace necesario que se cumplan ciertos requerimientos como:

- Aumento de la infiltración
- Disminución de la superficie erosionada
- Aumento de la masa vegetal
- Disminución de la sedimentación
- Disminución de la pérdida de suelo
- Restitución de las variables ecológicas<sup>85</sup>

Todo lo anterior, en virtud que dichos requerimientos contribuyen en conjunto a recuperar la homeostasis del lugar. De esta manera es imprescindible la aplicación de técnicas que permitan en conjunto volver a la condiciones iniciales que tenía el lugar (o lo más cercano posible a las condiciones iniciales) antes de su degradación. Dado que el perfil del trabajo es científico ambiental, se consideran además los servicios ecosistémicos que la recomposición del lugar (a su estado original o lo más cercano posible) tendría para el ecosistema presente y para la población en general.

De esta manera cabe preguntarse: ¿Cómo disminuir la superficie erosionada y aumentar la cobertura vegetal maximizando con ello la fijación de carbono?, ¿Puede además de esto constatarse cuantitativamente y evaluar fenomenológicamente el modelo que implique impacto de las obras de restauración ecológico forestal en las microcuencas de Alto Loica?<sup>86</sup>.

La fijación de carbono es solo uno de los tantos servicios ecosistémicos que la naturaleza entrega a los seres vivos, ya que, no solo la obtención de recursos naturales para uso humano es la única actividad que los seres humanos obtienen de la naturaleza.

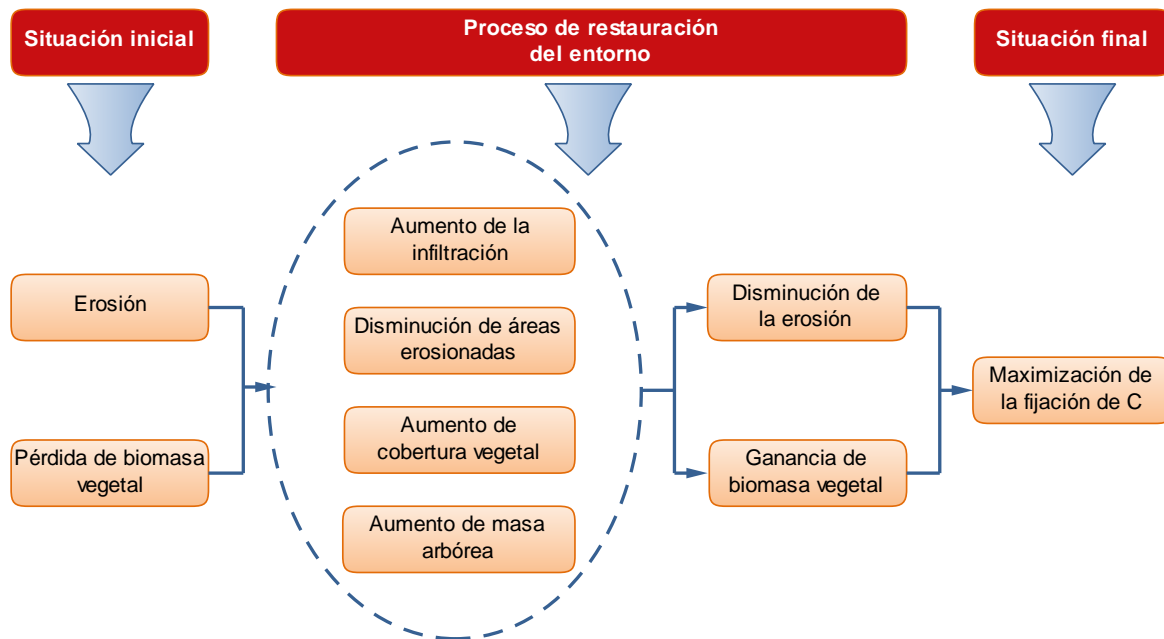
---

<sup>84</sup> Los estudios actuales no solo están centrados a fijación de carbono en sí, los bonos de carbono surgieron como una alternativa viable para la reducción de los gases invernadero para de alguna forma, mitigar los efectos que estos tienen en la atmosfera con todos los efectos nocivos que ello conlleva. Los estudios de captura de carbono atmosférico resulta clave para este tipo de actividades.

<sup>85</sup> En este caso solo se consideran elementos como fauna y cadenas tróficas. No se consideran elementos bioclimáticos.

<sup>86</sup> Problema ya planteado en la introducción

De esta forma la recuperación de un entorno natural no solo persigue fines económicos sino también ecológicos y ecosistémicos (Martínez-Harms y Gajardo, 2008).



**Figura 6.8. Problemática de los suelos en las microcuencas de Alto Loica.** La situación inicial de las microcuencas involucraba altos índices de erosión y pérdida de masa arbórea, los requerimientos necesarios para restituir el entorno a su estado lo más cercano a su original implica disminuir la erosión y aumentar la cobertura y masa vegetal para maximizar con ello la fijación de carbono. Fuente: Elaboración propia.

### 6.2.2. Alternativas de solución

La recomposición de un ecosistema incluye la restitución de redes que establezcan nuevamente los circuitos energéticos a través de todos los elementos bióticos y abióticos que componen una comunidad ecológica. Dado que el problema básico es el aumento de la cobertura y masa vegetal, es importante el establecimiento de técnicas que permitan un equilibrio entre todos los elementos interactuantes (suelo, agua, masa vegetal, etc...). De esta forma, la solución debe de algún manera reducir el alto grado de entropismo presente en las microcuencas, de tal forma que mientras más reconstituido esté el ecosistema, mejor será la captura de carbono a todo nivel (masa vegetal y suelo).

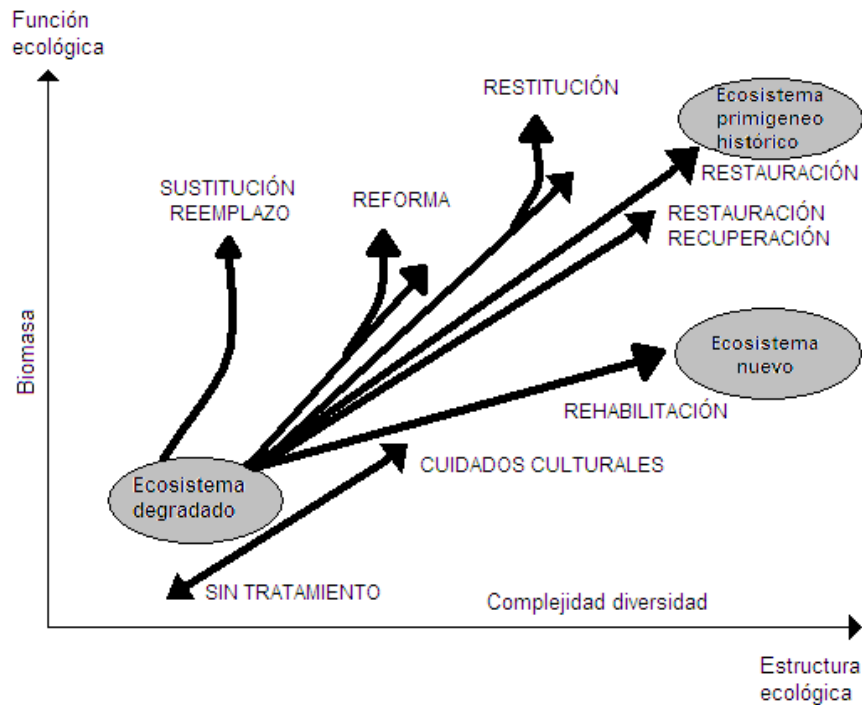
Esto último significa que hay dos elementos presentes en la restitución de un ecosistema degradado: la estructura ecológica y la función ecológica (Gómez, 2004). La estructura ecológica está dada principalmente por los elementos físicos presentes como masa arbórea, fauna, elementos abióticos, etc; en cambio, la función ecológica (que es más difícil de obtener) está dada por la interrelación sistémica de los elementos que componen un ecosistema y por la relación que estos tienen con factores bioclimáticos.

Dada la complejidad de esto último, Gómez (2004) plantea una serie de soluciones para ecosistemas degradados, basados en fines puntuales según el perfil de la especificidad a trabajar.

TRATAMIENTO	SIMBOLO	DESCRIPCION
<b>Restauración</b>	Rt	Estilos de tratamientos muy diferentes a través de los cuales se pretende emular con mayor o menor fidelidad, la estructura, funcionalidad y dinámica de un ecosistema anterior a la perturbación humana.
<b>Restitución</b>	Rs	Búsqueda de una solución final distinta pero relativamente similar a la situación primitiva. Se fija en determinados aspectos del ecosistema pero no en la totalidad.
<b>Rehabilitación</b>	Rh	Busca llevar al espacio degradado a una situación que se considera aceptable y útil desde el punto de vista del entorno sin pretender ninguna aproximación al estado inicial antes de la degradación.
<b>Reforma</b>	Rf	Facilita la acción de la naturaleza para que el espacio degradado vuelva a ser ocupado por una sucesión natural. Por ejemplo: detener la degradación, eliminar contaminantes, mejorar capacidad del suelo, etc...
<b>Revegetación</b>	Rv	Implantación de cubierta vegetal (autóctono o alóctono) cuya finalidad puede ser muy variable: estabilizar terrenos, controlar erosión, etc...
<b>Sustitución</b>	St	Implementar un ecosistema con las condiciones reales del espacio degradado, sin eliminar los elementos de degradación, por ejemplo, implementar un bosque en lugares contaminados sin eliminar el contaminante.

**Tabla 6.1. Tratamientos para ecosistemas degradados.** La tabla presenta 6 alternativas de solución distintas. La aplicación de tratamientos específicos para lugares o ecosistemas con un alto grado de deterioro estará en función de las necesidades o requerimientos que se necesiten para los usos que se darán a ese territorio, por ello, las alternativas mostradas en la tabla tienen diferentes perfiles. Algunas de ellas persiguen volver al ecosistema original mientras que algunas solo ciertas características. Fuente: Gómez, 2004.

Las alternativas de solución planteadas en la tabla anterior están en función de los objetivos que persigan la recomposición de un ecosistema. Muchas veces no se necesita llegar a un entorno con características similares a las que había antes de la degradación, solo similares o en algunos casos solo se busca intervenir ciertas propiedades del entorno con fines productivos o de asentamiento humano no importando las condiciones ecológicas originales. Las bases de los tratamientos están directamente relacionadas con la función específica que se persigue para intervenir un entorno, por lo tanto, las variables ecosistémicas o antrópicas no siempre serán las condicionantes claves en la reconstitución de un ecosistema degradado, en otras palabras, la reestructuración de las redes sinérgicas de un ecosistema no serán la prioridad al momento de recomponer. Lo serán, los objetivos claves que se tienen al momento de intervenir el ecosistema deteriorado.



**Figura 6.9. Trayectoria en el tiempo según enfoque del tratamiento.** La biomasa estará en función de los tratamientos empleados para la restauración ambiental. Aunque, el curso de evolución del ecosistema será de naturaleza impredecible. Fuente: Gómez, 2004

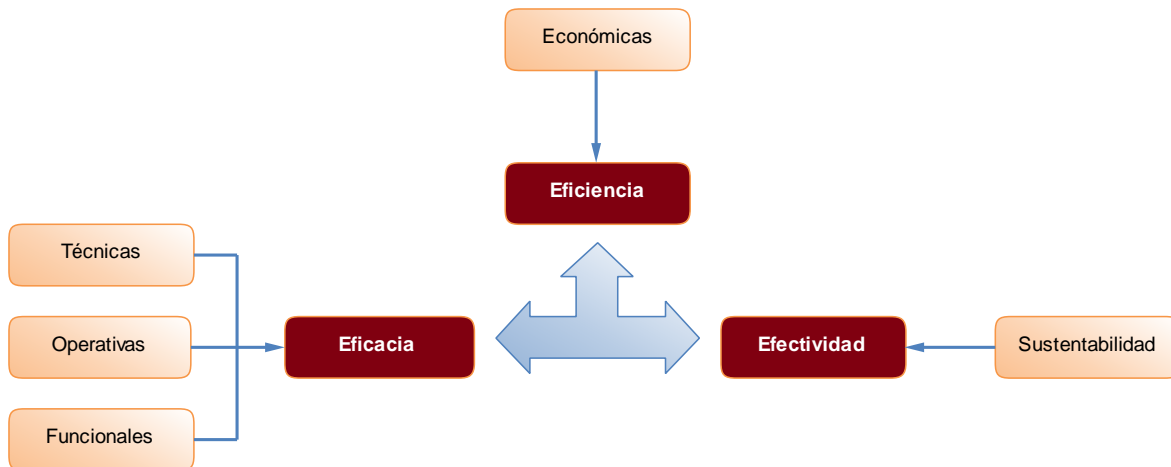
### 6.2.3. Criterios de evaluación y selección

Dadas las alternativas expuestas en la tabla 6.1 es imprescindible escoger la alternativa más idónea para la problemática en cuestión. Dado lo anterior, es necesario abordar ciertos parámetros o criterios que sustentarán la alternativa más ajustada a los perfiles y objetivos planteados por la investigación. Los criterios utilizados para evaluar y seleccionar la alternativa óptima son los criterios técnicos, funcionales, operativos, económicos, sustentables y medioambientales.

- a) *Técnicos*: tipifica las especificaciones estructurales e ingenieriles que deben tener los elementos (o dispositivos), empleados en la implementación de la solución en el ecosistema degradado. La viabilidad técnica implica la sincronización de la implementación con la estructura y componentes del ecosistema degradado, esto último no solo implica la intervención física, sino, la gestión que se efectúe con todos los actores involucrados.
- b) *Funcionales*: especifica los aspectos propios del sistema en el lugar de la implementación. La funcionalidad del diseño implica que este debe cumplir con los requisitos específicos de sus características intrínsecas.
- c) *Operativos*: la operatividad dice relación con que la implementación de la solución responda con la interacción de procesos que ocurren en el ecosistema degradado y que sea posible una retroalimentación entre la implementación de la solución y

los procesos ecosistémicos que ocurran entre la estructura del diseño y los fenómenos ecológicos<sup>87</sup> que ocurran en la zona de intervención.

- d) *Económicos*: el elemento económico condiciona la gestión e implementación de estrategias y técnicas de restauración de suelos. Esto se produce (en la mayoría de las veces) por su elevado costo, en la cual, intervienen factores como la extensión del territorio a intervenir, tipo de intervención y los elementos técnicos y humanos involucrados. Actualmente en estrategias de marketing la solución óptima está estrechamente ligada al factor económico, ya que, el paradigma de la eficiencia domina gran parte de la escena económica (Daft y Marcic, 2006). Si bien el factor económico puede ser clave en la toma de decisiones, las sinergias que se producen en la parte ambiental o el alto grado de aleatoriedad e incertidumbre de los sistemas ecológicos, conlleva a que el criterio económico no sea absoluto al momento de determinar e implementar una solución puntual en temas medioambientales.
- e) *Sustentabilidad*: “algunas actividades pueden tener un efecto restaurador o recuperador de ecosistemas. Otras pueden tener un impacto insignificante en el medio ambiente y un impacto social deseable” (Rojas, 1993). Básicamente la sustentabilidad implica que la solución no sea invasiva con el medio ambiente y que no tenga efectos secundarios, ni que su mantención implique grandes costos a futuro. La clave de la sustentabilidad implica extender la implementación a procesos que no impliquen una alteración de los ciclos biogeoquímicos y (cuando la instalación de ciertos elementos así lo requiera) ciertos elementos se integren a ciclos de reciclabilidad y biodegradabilidad<sup>88</sup>.



**Figura 6.10. Criterios de evaluación y selección en función de los logros y alcance de la solución.** Los criterios deben responder a variables como alcance de los objetivos, uso racional de recursos y que esta solución se mantenga en el tiempo sin alterar a futuro las condiciones del entorno y no tenga efectos secundarios. Fuente: Elaboración propia.

<sup>87</sup> Capacidad de respuesta a eventos pluviométricos, crecidas, estabilización de taludes, respuestas de la fauna a la introducción de flora exótica, procesos ocurridos en las zonas bajas de una cuenca si la intervención se efectúa en las zonas altas, etc...

<sup>88</sup> Muchas soluciones son adecuadas porque cumplen su función en su momento, pero los efectos secundarios pueden literalmente acabar con el sistema completo. Este problema es de antigua data: Civilizaciones del Medio Oriente –como Babilonia– colapsaron por la implementación de soluciones que dieron respuesta a sus necesidades inmediatas pero terminaron por arruinar los suelos (Brailovsky, 2004)

#### 6.2.4. Tabulación de alternativa óptima

Para la elección de la alternativa óptima se establecieron 2 mecanismos claramente diferenciados uno de otro: uno cuantitativo y uno cualitativo; determinándose un mecanismo binario para el primero y una clave para el segundo.

##### a) *Sistema binario para puntuación de las características de las alternativas de solución*

La tabulación de la alternativa óptima se establece determinando las características de cada alternativa en función de los criterios de evaluación y selección (ya descritos). De esta forma se establece un mecanismo binario<sup>89</sup> en el cual, se establece la sumatoria para cada alternativa. En la tabla 6.2 se establece la puntuación<sup>90</sup> cada característica dando el siguiente resultado:

Rt: 20  
Rs: 17  
Rh: 15  
Rf: 11  
Rv: 8  
St: 5

En la práctica (en algunos casos) la sumatoria puede ser menor debido a los objetivos del proceso de recomposición del ecosistema degradado, esto porque la acción emprendida en el medio ambiente está en función de los objetivos que fomentan la intervención, por ejemplo, en algunos casos solo se pretende estabilizar un talud, mientras en otros se pretende disminuir la pérdida de suelo en una ladera. Por ello la tabla 6.2 entrega antecedentes globales respecto de los procesos involucrados en cada estrategia de solución.

##### b) *Clave para la elección de la alternativa óptima:*

Creada como elemento complementario al mecanismo binario para la determinación de la alternativa óptima, la clave es solo una herramienta que estipula los aspectos básicos para determinar o asignar categorías, llegando hasta niveles básicos (Marvaldi , 2003)

La clave es una herramienta dicotómica construida para las alternativas de solución basada en sus características o su contribución (en este caso) a la recomposición de la estructura ecológica o la función ecológica dependiendo de sus propiedades particulares. La clave se construyó en frases contrastantes, las que separan en grupos diferentes a las alternativas de solución

---

<sup>89</sup> Se estipula un 1 si la alternativa de solución cumple con la condición planteada y un 0 si la alternativa no la cumple.

<sup>90</sup> Algunas puntuaciones de determinadas características se determinan en función de su respuesta en el tiempo, en base a cómo responden respecto de su rol en el ecosistema, esto es, si responden a su participación en la "estructura ecológica" o a la "función ecológica".

<b>Criterios</b>	<b>Características</b>	<b>Rt</b>	<b>Rs</b>	<b>Rh</b>	<b>Rf</b>	<b>Rv</b>	<b>St</b>
<b>Técnicos</b>	Estabilización de taludes	1	1	1	0	1	1
	Regulación de flujos en causes	1	1	1	0	0	0
	Estabilización de laderas	1	1	1	0	1	1
	Control de la erosión	1	1	1	1	1	1
	Control de cárcavas	1	1	1	1	1	0
<b>Funcionales</b>	Disminución de la pérdida de suelo	1	1	1	1	1	0
	Aumento de la Infiltración	1	1	1	1	0	0
	Reabastecimiento de napas freáticas	1	1	1	1	0	0
	Disminución de la escorrentía superficial	1	1	1	1	0	0
	Control de crecidas	1	1	1	0	0	0
<b>Operativos</b>	Disponibilidad de agua para especies vegetales	1	1	1	1	0	0
	Disminución de la sedimentación de cauces	1	1	1	1	1	0
	Aumento de la cobertura vegetal	1	1	1	1	1	1
	Aumento de la biomasa vegetal	1	1	1	1	1	1
	Mejoramiento de la capacidad del suelo	1	1	1	1	0	0
<b>Económicos</b>	Implementación	0	0	0	0	0	0
	Mantenimiento	0	0	0	0	0	0
<b>Sustentables</b>	Colonización por fauna	1	1	0	0	0	0
	Aumento de la evapotranspiración	1	1	0	0	0	0
	Integración al ecosistema	1	0	0	0	0	0
	Restitución de las funciones ecológicas	1	0	0	0	0	0
	Integración de los dispositivos a las sinergias ecosistémicas del entorno	1	0	0	0	0	0

**Tabla 6.2. Puntuación de las características de las alternativas de solución en función de los criterios de selección.** La puntuación de las características de cada solución está estructurada en base a un sistema binario (1 si cumple la condición y 0 si no la cumple). Fuente: Elaboración propia.

	Procedimiento	Tratamiento	Símbolo
<b>1</b>	Reconstrucción del ecosistema degradado		
a)	Técnicas y procedimientos que conllevan a un ecosistema con las mismas condiciones iniciales que tenía el entorno antes de la degradación	Restauración	Rt
b)	Técnicas y procedimientos que conllevan a una solución distinta al ecosistema que existía antes de la degradación (Ir a 2)		
<b>2</b>	Implementación de una solución considerada útil desde el punto de vista del entorno		
a)	Reconstruir solo determinados aspectos del ecosistema inicial pero no la totalidad.	Restitución	Rs
b)	No hay intención alguna de aproximación al estado inicial antes de la degradación (Ir a 3)		
<b>3</b>	Implementación de una solución aceptable para el medio ambiente o ecosistema degradado		
a)	Implementación de dispositivos para constituir un ecosistema distinto al que había inicialmente, y que cumpla los objetivos por el cual fue implementado	Rehabilitación	Rh
b)	La solución no contempla la implementación de dispositivos <sup>91</sup> . (Ir a 4)		
<b>4</b>	Implementación de soluciones basadas solamente en la incorporación de cubiertas vegetales		
a)	Eliminar contaminantes o mejorar la capacidad del suelo	Reforma	Rf
b)	Solución ideada solo para restituir solo la estructura ecológica (Ir a 5)		
<b>5</b>	Establecer mecanismos solo para soluciones puntuales en un entorno degradado sin pretender intervenir en el entorno completo		
a)	Estabilizar terrenos, detener erosión, estabilizar laderas, etc...	Revegetación	Rv
b)	Intervenir un entorno pero sin eliminar los elementos de degradación (no eliminar contaminantes, etc...)	Sustitución	St

**Tabla 6.3. Clave para la determinación de la alternativa a utilizar según objetivos de la intervención.** Los 6 procedimientos mencionados en la tabla buscan revertir ciertos fenómenos de degradación en un ecosistema, pero, el proceso de recomposición de las condiciones estructurales y funcionales de un ecosistema estará en función de los objetivos bajo los cuales se efectuará esa recomposición, en otras palabras, el “porque” y “para que” se recompondrá un ecosistema degradado. Fuente: Elaboración propia.

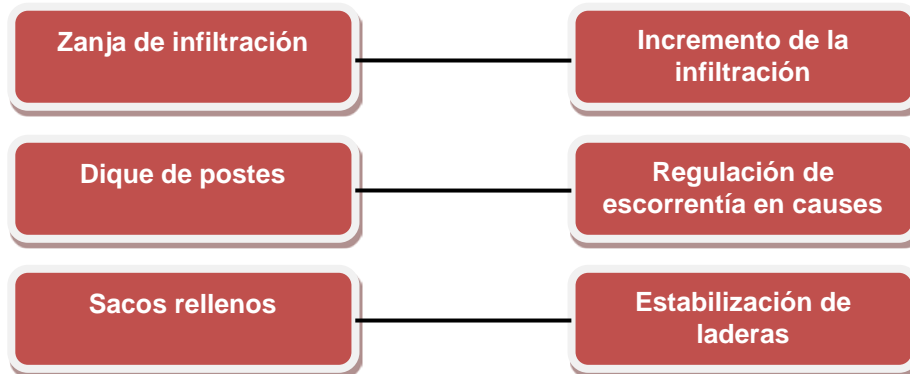
<sup>91</sup> Por ejemplo, dispositivos hidrológico – forestales.



### 6.2.5. Modelo de requerimientos

Los mecanismos descritos anteriormente sitúan a la restauración como el mecanismo más adecuado para cumplir los objetivos planteados al inicio del trabajo. Si bien, estrictamente en cuanto a tiempo y costos, otras alternativas resultan más viables, el modelo binario sitúa a la restauración como la alternativa con más elementos a favor; al igual que la clave que coloca a ésta última con más elementos que configuran un escenario más viable para el cumplimiento de los objetivos.

En este apartado se tipifican los requerimientos del sistema, es decir, las condiciones o capacidades que el sistema va a tener para cumplir con los objetivos planteados. Estas condiciones se enmarcan en el denominado “modelo de requerimientos”, el cual, definirá las especificaciones del problema a solucionar. Los requerimientos se diferencian en funcionales y no funcionales (Arias, 2006), siendo los primeros los que definen las funciones que el sistema será capaz de realizar y los segundos los elementos que limitarán las funciones del sistema. Sommerville (2005), entrega otra definición para requerimiento; “Un requerimiento es simplemente una declaración abstracta de alto nivel de un servicio que debe proporcionar el sistema o una restricción de éste”.



**Figura 6.11. Modelo de caso de usos para las obras de Alto Loica.** La figura muestra las obras más representativas instaladas en Alto Loica, las cuales interactúan con el medio ambiente. La figura define el contacto entre la obra con el sistema y que es lo que debe ser hecho por el sistema cuando este interactúa con los actores. Fuente: Elaboración propia.

Antes de implementar la solución elegida, es imprescindible determinar cuáles son las funciones que los elementos del sistema llevarán a cabo cuando estén en contacto con el ecosistema, ya que, los dispositivos de restauración hidrológico – forestal deben interactuar con el medio ambiente y en este punto deben cumplir a cabalidad con la tarea para la cual fueron construidos; por ello previamente hay que determinar “que” función realizaran y no “como” la realizaran. La determinación de los requerimientos para el caso de Alto Loica está en función de las tareas que las obras como diques, zanjas, muretes, sacos de tierra y empalizadas, entre otras, llevan a cabo en las microcuencas de trabajo cuando los elementos de entrada interactúan para generar determinadas respuestas. La sinergia que se produce en la zona de interacción se debe a la conjunción de funciones generadas por los flujos de entrada al sistema.

Requerimientos Funcionales	Requerimientos no funcionales
Estabilización de taludes	Rendimiento
Regulación de flujos en cauces	Robustez del sistema
Estabilización de laderas	Disponibilidad
Control de la erosión	Mantenimiento
Control de cárcavas	Seguridad
Aumento de la Infiltración	Estándares
Disminución de la escorrentía superficial	Confiabilidad
Control de crecidas	
Disminución de la sedimentación de cauces	
Aumento de la cobertura vegetal	
Aumento de la biomasa vegetal	
Mejoramiento de la capacidad del suelo	

**Tabla 6.4. Requerimientos del sistema de restauración de Alto Loica.** La tabla solo menciona algunos de los requerimientos del sistema de restauración en Alto Loica. Según Arias (2006), los requerimientos deben ser específicos, consistentes y no ambiguos. En la tabla se mencionan algunos tanto funcionales como no funcionales para las microcuencas de Alto Loica. Fuente: Elaboración propia.

Arias (2006), proporciona aspectos elementales sobre las características de los requerimientos, las cuales son:

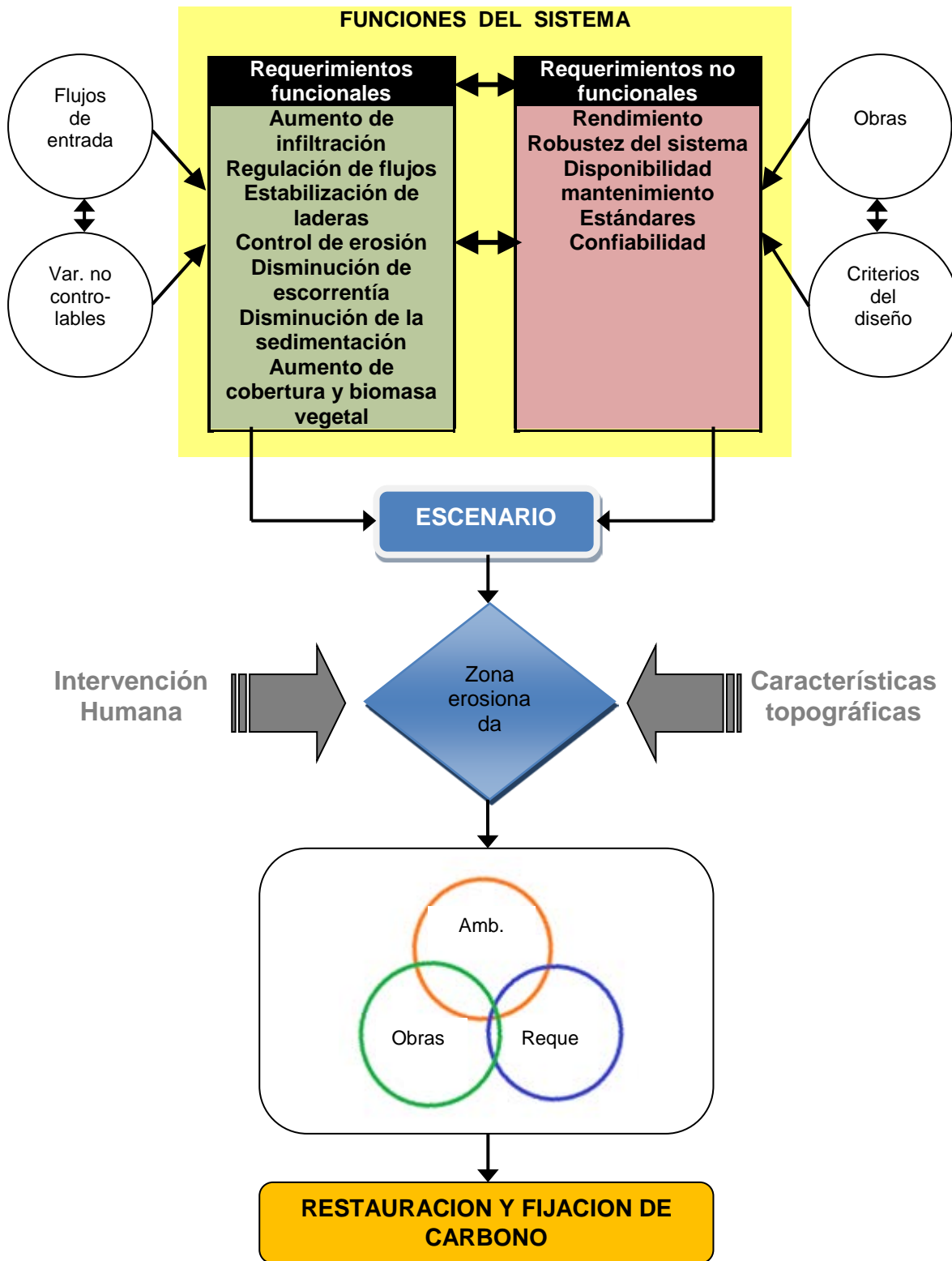
- Debe ser especificado por escrito
- Posible de probar o verificar.
- Conciso
- Completo
- Consistente
- No ambiguo

El mismo autor (Arias, 2006), entrega información sobre las dificultades de los requerimientos, las cuales son:

- Los requerimientos no son obvios y vienen de muchas fuentes.
- Son difíciles de expresar en palabras (el lenguaje es ambiguo).
- La cantidad de requerimientos en un proyecto puede ser difícil de manejar
- Un requerimiento puede cambiar a lo largo del ciclo de desarrollo.

A esto se puede añadir:

- Suele en ocasiones confundirse un requerimiento con un procedimiento de salida del sistema
- Polisemia en cuanto al concepto "requerimiento"
- Dificultad al momento de categorizar y clasificar los requerimientos



**Figura 6.12. Modelo de requerimientos de Alto Loica.** El modelo de requerimientos para las obras de restauración de Alto Loica se basan en las funciones que realizan los dispositivos empleados utilizando los flujos de entrada, además la figura aborda los elementos que limitan la acción de las obras implementadas en las microcuencas. Fuente: Elaboración propia.

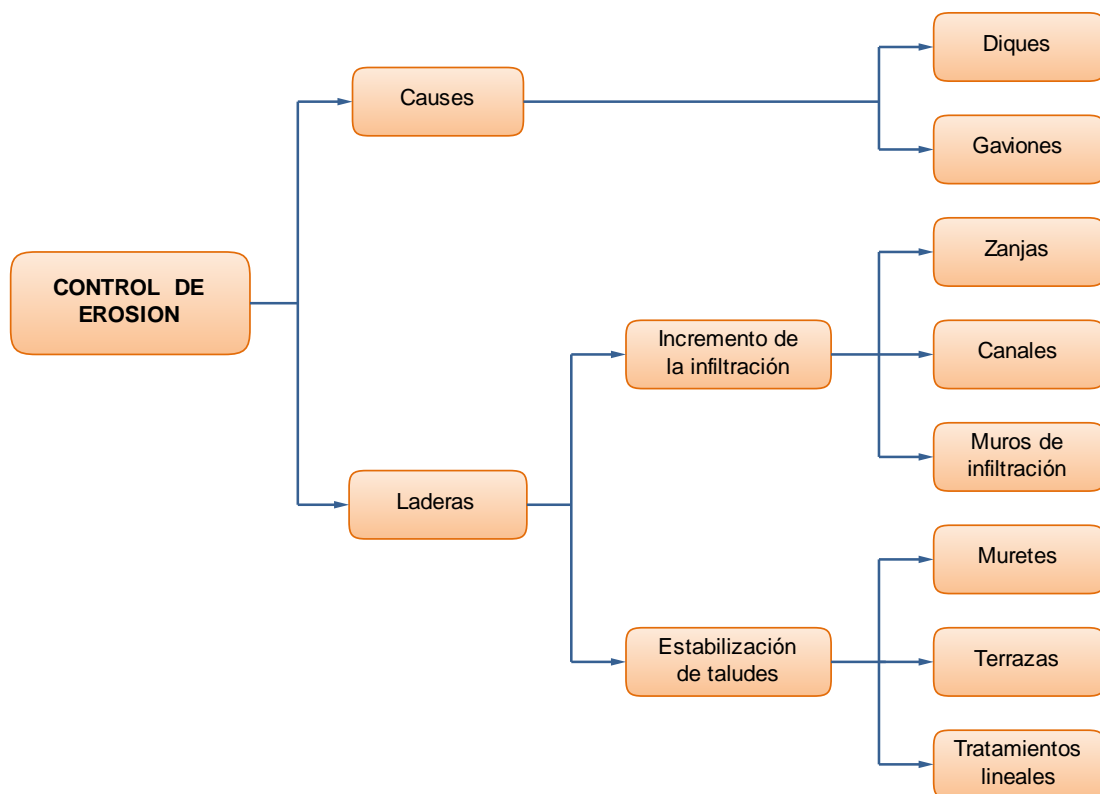
### 6.3. ESPECIFICACIÓN

#### 6.3.1. Diseño de estrategias

##### 6.3.1.1. Dispositivos de restauración

Los dispositivos de restauración son la base fundamental en la implementación de la estrategia de restauración de las microcuencas hidrográficas. Estas consisten básicamente en obras mecánicas del tipo hidrológico – forestal que en términos generales tienen por objeto dos grandes lineamientos: control de causas superficiales y el trabajo en laderas (Anexo 6). Estas obras se encargan de dividir y conducir el escurrimiento superficial sobre las áreas de drenaje, además de retener el agua sobre al área de impluvio, que es la zona donde se efectúa el control.

En lo que respecta al control de causas, las obras disminuyen la energía cinética del agua y controlan la emisión de sedimentos hacia los cursos de agua. En cuanto al control de laderas la temática central tiene dos ejes: el primero consiste en incrementar la infiltración para el abastecimiento de las napas freáticas además de aumentar la cantidad de agua disponible para la vegetación; de esta forma se “cosecha” agua de lluvia para la optimización del ecosistema; el segundo dice relación con la estabilización de taludes para controlar la erosión e impedir la pérdida de suelo.



**Figura 6.13. Clasificación de obras de restauración en relación a su función.** Básicamente las obras de restauración hidrológico forestal se clasifican (según su función) en obras para el control del flujo superficial en cauces y el control de laderas, ya sea para estabilizar los taludes e incrementar la infiltración. La figura muestra las obras implementadas en las microcuencas experimentales en Alto Loica. Fuente: Francke, et al, 2004

El obras de restauración hidrológico – forestal tienen como objetivo central el tratamiento contra la erosión en zona afectadas o gravemente afectadas. Dependiendo de las necesidades del sector a tratar (en función de la topografía, suelo, requerimientos, etc...) los tratamientos se clasifican en tratamientos generales, los cuales, están ligados a los requerimientos funcionales del sistema y los tratamientos específicos, que consisten en las obras puntuales que una vez implementadas deben cumplir con el objetivos puntual dado por el tratamiento general. Francke (2004) diferencia 7 tipos de tratamientos diferentes para controlar la erosión, los cuales a su vez contemplan obras específicas. Es importante destacar que la implementación de una obra por sí sola no es suficiente para revertir los procesos erosivos, por el contrario, la conjunción y el funcionamiento en conjunto de varias obras en una cuenca hidrográfica generarán procesos sinérgicos que disminuyan la erosión y aumenten la cobertura vegetal.

Tratamientos Generales	Tratamientos Específicos	Simbología
<b>Regulación de flujos hídricos</b>	Canal de desviación	Cd
	Canal longitudinal	Cl
	Canal transversal simple	Cts
	Canal transversal compuesto	Ctc
	Canal longitudinal de sacos de tierra	ClS
<b>Incremento de la infiltración</b>	Zanjas de infiltración	Zi
	Terraza forestal	Tf
<b>Obras lineales de ladera y taludes</b>	Postes de madera	Pm
	Fajinas de sarmiento	Fs
	Fajinas de ramas	Fr
	Tratamiento lineal de sacos	Tls
	Revestimientos de neumáticos	Rv
<b>Cubiertas superficiales</b>	Esteras de especies	Es
	Ramas de eucaliptus	Re
	Cañas de maíz	Cm
<b>Regulación de flujos hídricos en cauces</b>	Dique de poste de madera	Dp
	Dique de estructuras gavionadas	Dg
	Disipadores	Ds
<b>Control y estabilización de taludes</b>	Estructura de postes de madera	Epm
	Malla de sombra	Ms
	Muro de sacos rellenos	Msr
	Muro de neumáticos	Mn
	Muro de postes de madera	Mpm
<b>Biológicos</b>	Hidrosiembra	Hs

**Tabla 6.5. Clasificación de las obras y tratamientos de control de erosión.** Las obras de tratamiento se enfocan según distintos parámetros e indicadores que estén en sintonía con el área elegida según los requerimientos y necesidades del sitio a restaurar. Fuente: Francke, et al, 2004.

#### a) Zanjas de infiltración

Esta técnica es recomendable para la restauración de terrenos muy erosionados y se basa en el terraceo del terreno para contrarrestar los efectos de la erosión y juntar el máximo de agua proveniente de los escurrimientos superficiales (Espinoza y Sánchez, 2006). Se emplean en zonas semiáridas debido a que el flujo directo representa el componente principal del flujo hídrico total, aunque, no se hacen zanjas en suelos no estructurados ni muy arcillosos por la baja infiltración (Tapia, et al, 2008)

A través de esta técnica se regulan los volúmenes de escorrentía superficial; la reducción de la escorrentía evita el arrastre de partículas disminuyendo la erosión hídrica debido a la disminución de la velocidad del agua. Además permite la acumulación de agua de las lluvias para el riego y a su vez aumenta la cantidad de agua infiltrada abasteciendo con ello las napas freáticas. La sumatoria del caudal debe redistribuirse en el suelo, por ello se construye más de una zanja en las pendientes; de esta manera, el conjunto de zanjas funciona como un sistema evitando la acción erosiva de la escorrentía superficial y aumentando la cantidad de agua “cosechada”. Por ello, las zanjas deben tener una disposición intercalada, en función de la eventualidad que los volúmenes de escorrentía superen la capacidad de almacenaje de las zanjas, produciéndose el rebalse en éstas (Francke, et al, 2004).



**Figura 6.14. Zanjas de Infiltración en la microcuenca 2.** A través de esta técnica se regulan los volúmenes de escorrentía superficial y se almacenan o “cosechan” aguas para el riego. Fuente: Captación propia.

#### b) Canal de desviación

Básicamente (y como su nombre lo indica) la construcción de esta obra tiene su fundamento en disminuir la escorrentía superficial y “desviar” el agua proveniente de las lluvias para evitar la erosión hídrica y la pérdida de suelo por arrastre de material en laderas. Se basa en la elaboración de canales que conducen el agua hacia las zonas más bajas de la ladera evitando que estas formen cárcavas; por ello se construyen en las zonas superiores donde estas se encuentren. En algunos casos, los canales se complementan con la construcción de embalses hacia donde son conducidas las aguas para su posterior aprovechamiento en labores de riego (Francke, et al, 2004)



Esta técnica resulta útil para regular el gran volumen del flujo directo o de la escorrentía superficial en las zonas semiáridas. La ejecución se realiza sobre la cabecera de las cárcavas y/o en laderas con riesgos de erosión creciente. En cabeceras de cárcavas se recomienda la realización de un canal que desvíe las aguas para ambos lados, de tal forma de disminuir la descarga en ambos vertederos. Los vertederos deben construirse en laderas estabilizadas con presencia de vegetación (Francke, et al, 2004).



**Figura 6.15. Canal de desviación en la microcuenca 2.** Esta técnica resulta útil para regular el gran volumen del flujo directo o de la escorrentía superficial en las zonas semiáridas. Fuente: Captación propia.

### c) *Diques de postes*

El dique de poste es una obra fundamental para impedir la socavación producida en las cárcavas producto de la erosión hídrica y evitar de esta forma la emisión de sedimento hacia los cauces que puedan estar presentes en las zonas bajas de la ladera; siguiendo este principio, se construye más de un dique (la zona superior de uno debe estar al nivel de la zona inferior del otro dique) de tal forma que funcionan como un sistema, ya que, lo que erosiona es igual a lo que sedimenta (De Simón, et al, 1998).

Un dique representa una obra relevante en el control de erosión en zonas de cárcavas al regular el flujo hídrico y contener los sedimentos transportados, ya que, resiste la socavación y estabiliza las pendientes del lecho de las cárcavas. La vida útil del dique se estima superior a los 10 años (Francke, et al, 2004), aunque, esto se relaciona con su estructura, clima, escorrentía, etc<sup>92</sup>..... La vida útil aumenta siempre que se realice con postes de pino impregnados; esto último es fundamental desde el punto de vista de la integración de la obra al sistema, ya que, en el caso de ser construidos con postes de madera, esta se degrada incorporándose a los ciclos biogeoquímicos del lugar, en cambio de efectuarse con elementos inorgánicos (PVC; entre otros) se están incorporando elementos ajenos al ecosistema.

Toda esta estructura además condiciona la plantación y siembra en las cárcavas para restituir una cubierta vegetal que con el tiempo devuelva la capacidad al entorno de impedir el impacto de la gota de lluvia y disminuir la escorrentía superficial.

<sup>92</sup> En Alto loica hay diques que ya terminaron su vida útil, mientras que otros están en perfectas condiciones a pesar de haber sido construidos al mismo tiempo. Esto porque las variables (exposición, pendiente, escorrentía, etc...) son diferentes a pesar que los elementos de construcción son los mismos.



**Figura 6.16. Dique de poste en la microcuenca 3.** Un dique es una obra relevante en el control de erosión en zonas de cárcavas al regular el flujo hídrico y contener los sedimentos transportados. En la imagen se observa el dique con la disposición de los postes y un dissipador (construido con piedras de río) en la zona inferior que tiene por función impedir el impacto directo del flujo de agua durante los eventos pluviométricos. Fuente: Captación propia.

d) *Dique de estructura gavionada*

Los gaviones se construyen en cauces (permanentes o estacionales) y por múltiples razones, entre las cuales base destacar: (a) acciones antrópicas que han eliminado la cubierta vegetal en de los sectores aledaños y (b) cambios bruscos en la pendiente de los cauces (Núñez, et al, 1982). El gavión, disminuye la energía cinética del agua impidiendo que esta arrastre material aumentado la sedimentación debido a la inexistencia de una cubierta vegetal que proteja las riberas sobre todo en las épocas de crecidas. Además limpia las impurezas y filtra los sedimentos que provengan de los sectores más altos del cauce (sobre todo si las zonas altas están con altos grados de erosión<sup>93</sup>). Esta estructura actúa por resistencia mecánica y permite regular los flujos hídricos en cauces medianos y mayores, debido a su gran resistencia en períodos de crecidas (Francke, et al, 2004).



**Figura 6.17. Estructura gavionada en la microcuenca 2.** Este tratamiento permite regular los flujos hídricos en cauces medianos y mayores, debido a su gran resistencia en períodos de crecidas. Fuente: Captación propia.

<sup>93</sup> Un ejemplo de esta construcción puede observarse en el estero Marga – Marga en la ciudad de Viña del Mar en la zona central de Chile. La construcción de gaviones en este estero han contribuido a disminuir la sedimentación generada por la deforestación que se produjo en las zonas altas del estero (aproximadamente a 12 Km de su desembocadura en el mar) debido a los lavaderos de oro que desde tiempos coloniales funcionaron en la zona.



e) *Muro de poste de madera*

El muro de poste se implementa principalmente para estabilizar taludes y cárcavas en zonas erosionadas, de tal forma que impide la pérdida de suelo desde las zonas altas de las laderas. Además, es altamente recomendable su construcción en taludes que estén cerca de cauces de agua, debido a que impiden la acumulación de sedimento proveniente de la erosión hídrica. A través de este tipo de tratamientos se pueden estabilizar áreas inestables de taludes, de cauces y de cárcavas, así como también amortiguar el impacto lateral de flujos hídricos en cursos de agua (Francke, et al, 2004)..

Este tipo de muro se puede realizar con distintos tipos de madera. La diferencia radica en su vida útil. Se recomienda utilizar postes de pino impregnados para aumentar la vida útil a períodos superiores a 10 años (Francke, et al, 2004).



**Figura 6.18. Vista frontal de muro de poste de madera en la microcuenca 3.** A través de este tipo de tratamientos se pueden estabilizar áreas inestables de taludes, también amortiguar el impacto lateral de flujos hídricos en cursos de agua. Fuente: Captación propia.

f) *Muro de sacos rellenos*

A través de este tipo de tratamientos se pueden estabilizar áreas inestables de taludes, de cauces y de cárcavas, así como también amortiguar el impacto lateral de flujos hídricos en cursos de agua.

Este tratamiento resulta apropiado para aquellos taludes donde no existan intensas presiones del suelo de la ladera. Se puede realizar en dimensiones variadas. Se ejecuta de manera sencilla a bajos costos. Se requieren materiales como: sacos de malla sombra, tierra y semillas de pastos. Su vida útil depende del material del cual este estructurado el saco pudiendo fluctuar entre los 4 a 20 años, período suficiente para que los pastos se desarrollen y se asienten en el talud.

Los pastos deben sembrarse inmediatamente después de finalizar la colocación de cada corrida de sacos de tal forma de adelantarse al proceso de endurecimiento del suelo, provocado por procesos de compactación, cambios de humedad y de temperatura (Francke, et al, 2004).



**Figura 6.19. Muro de sacos rellenos en la microcuenca 2.** Este tratamiento resulta apropiado para aquellos taludes donde no existan intensas presiones del suelo de la ladera. Se puede realizar en dimensiones variadas. Fuente: Captación propia.

*g) Microterrazza forestal*

Las microterrazas se construyen en laderas dejando un segmento con una inclinación cercana al  $0^\circ$ , por lo tanto el nivel del suelo forma un ángulo recto con la normal. Ello contribuye a aumentar la infiltración del suelo por disminución de la escorrentía superficial, ya que, disminuye la velocidad de las aguas de las lluvias ladera abajo. Además, evita la pérdida de suelo y el arrastre de material por el flujo hídrico, quedando este retenido en la terraza.

Este tratamiento resulta apropiado en laderas de pendientes moderadas con erosión del tipo laminar y lineal incipiente. De sencilla ejecución y bajo costo. La longitud de la terraza se adecua al terreno (Francke, et al, 2004).



**Figura 6.20. Terraza forestal implementada en la microcuenca 2.** Este tratamiento resulta apropiado en laderas de pendientes moderadas con erosión del tipo laminar y lineal incipiente. En la figura se observan 2 secciones transversales con una planicie entre ellas, aunque la acumulación de sedimento en los últimos formado y la vegetación formaron un camellón en la terraza. Fuente: Captación propia



#### *h) Tratamiento lineal de sacos*

Los sacos se disponen sobre terrazas horizontales y tienen por función disminuir la erosión superficial en taludes. Esto último produce que en la zona de implementación de los sacos exista la menor cantidad posible de remoción de tierra, evitando con esto el arrastre de material desde las zonas altas a las zonas más bajas. Básicamente, esta obra se construye con sacos de malla tipo rashell de origen israelí, relleniéndose los sacos con tierra del mismo lugar para aumentar los niveles adaptativos del saco. Aunque el principal enemigo de esta obra es la humedad, resulta ser el primer control de emergencia ante un incendio y su duración es de aproximadamente 16 años (Francke, et al, 2004).



**Figura 6.21. Tratamiento lineal de sacos en la microcuenca 3.** Este tratamiento resulta apropiado en laderas de pendientes moderadas con erosión del tipo laminar y lineal incipiente. De sencilla ejecución y bajo costo. Fuente: Captación propia

#### *i) Estructura de poste de madera*

Esta obra de restauración se utiliza básicamente para taludes de baja dimensión, no resultando apropiada para laderas y zonas en las cuales el tránsito –ya sea de animales o personas– es relativamente frecuente. La implementación se efectúa en base a la instalación de postes de madera en forma transversal en el suelo formando una estructura como la que se parecía en la figura 6.22

Además de disminuir la pérdida de suelo por sedimentación en laderas, la función principal consiste en la preparación del suelo para la implementación de biotecnias y de esa forma, permitir el crecimiento de especies arbustivas para disminuir la erosión. La vida útil de esta obra (aunque está en función de la estabilidad de los postes de madera) es superior a los 15 años, tiempo en el cual, la capa vegetal ha colonizado plenamente la zona cumpliendo [la obra] en forma plena su función (Francke, et al, 2004).

En las zonas de secano de la zona central, en la cual, las estaciones son muy marcadas, el principal enemigo de esta obra son los incendios forestales, ya que, el desecamiento de los postes aumenta la combustión.



**Figura 6.22. Estructura de poste de madera en la microcuenca 2.** Este tratamiento resulta apropiado en laderas de baja dimensión y cuya finalidad –más que evitar la erosión en si– consiste en favorecer la implementación de biotecnias. Fuente: Captación propia

*j) Canal longitudinal de sacos de tierra*

Esta obra de restauración presenta gran utilidad para canalizar la escorrentía superficial y redirigirla hacia lugares como cauces, embalses, etc... A diferencia de los canales de desviación que generalmente se construyen en las zonas altas, los canales longitudinales de sacos de tierra se construyen en las zonas bajas como pie de ladera o zonas cercanas a cauces de agua superficiales con el fin de confluir la escorrentía hacia lugares deseados (Francke, et al, 2004).

Esta obra se construye con sacos de malla Rashell teniendo una vida útil de 15 años. Al igual de los muros de sacos rellanos se rellenan con tierra del mismo lugar para producir el menor impacto posible en el área. Sirven como control para los incendios y favorecen la colonización de especies herbáceas, de tal forma que al cabo del tiempo útil la capa vegetal estabilice el terreno disminuyendo la escorrentía superficial (Francke, et al, 2004).



**Figura 6.23. Canal longitudinal de sacos de tierra en la microcuenca 2.** Este tratamiento se utiliza para la desviación de escorrentía superficial hacia cauces y como elemento de apoyo a otras obras. Fuente: Captación propia



### k) Biotecnias

Esta técnica consiste en un tratamiento Biológico con especies herbáceas y leñosas arbustivas, cuyo fin es recuperar y estabilizar suelos degradados. Las biotecnias complementan los trabajos físico-mecánicos de las obras de restauración (en zonas como camellones y terraplenes y sacos) estabilizando áreas tales como: taludes, cárcavas y márgenes de cauces secundarios. Las especies más usadas en la zona central son pinos y eucaliptus debido a su gran adaptación y rápida velocidad de crecimiento. Las obras de restauración favorecen el crecimiento de las especies vegetales recuperando el ecosistema dañado. Para superficies estabilizadas se debe establecer más de un 60% de cobertura vegetal homogéneamente distribuida (Francke, et al, 2004).



**Figura 6.24. Biotécnicas en la microcuenca 2.** Tratamiento Biológico con especies herbáceas y leñosas arbustivas recuperadoras y estabilizadoras de suelos degradados. Fuente: Captación propia.

#### 6.3.1.2. Diseño lógico

El diseño lógico establece básicamente la distribución relacional que tienen las obras de restauración hidrológico – forestal. En las figuras que se muestran a continuación, se determinan que obras estarán relacionadas entre sí, en función de las necesidades del entorno y del objetivo puntual, sin embargo, el lugar específico (o distribución situacional o espacial) se describirá en los próximos apartados. La concatenación espacial de una obra con otra se estructura funcionalmente si es que la distribución de ellas en el espacio permite que las obras trabajen como un sistema, ya sea entre sí o con la combinación de otras. El primer paso consiste en establecer el objetivo puntual con que se trabaje en las microcuencas o en otras zonas; esto último justifica la implementación e instalación de los dispositivos de restauración. El objetivo a su vez estará influido por el estado de la zona a restaurar; si el objetivo fundamental es favorecer el crecimiento de especies arbóreas se priorizará la construcción de zanjas de infiltración, en cambio, si existe un cauce (o más de uno) y la erosión es severa o muy severa, lo mas optimo lo constituiría la implementación de sacos rellenos, muro de postes, diques (si hay cárcavas) y gaviones. El segundo paso que determina el diseño lógico es la topografía del terreno y la constitución del suelo. La implementación de las obras, así como sus dimensiones están condicionadas por elementos como la pendiente, ancho de una cárcava (para el caso de

diques), forma y contorno de la ladera, entre otras. Estos dos últimos elementos son determinantes debido a que el terreno tendrá distinto comportamiento ante determinados hechos en función de estas dos variables.

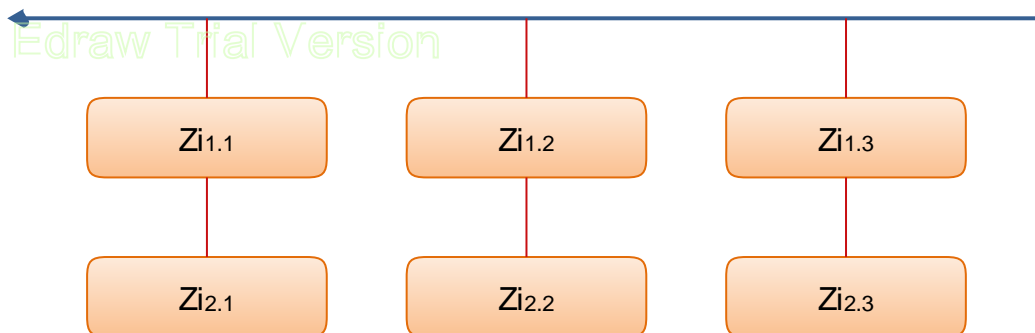
	Contorno		Ladera	
	Convexa	Recta	Cóncava	
Convexo	XXX	XX	X0	
Recto	XX	X0	00	
Cóncavo	X0	00	000	

**Tabla 6.6. Efecto de la forma y contorno de la ladera en la erosividad y riesgo de deslizamientos.** Mientras más convexa sea tanto la forma como el contorno de la ladera aumentará el riesgo de erosividad, mientras que a mayor concavidad tanto de la forma como del contorno, aumentará la probabilidad de deslizamiento. Estos elementos deben estar presentes al momento de la instalación de alguna obra de restauración. Fuente: Schlatter, et al, 2003.

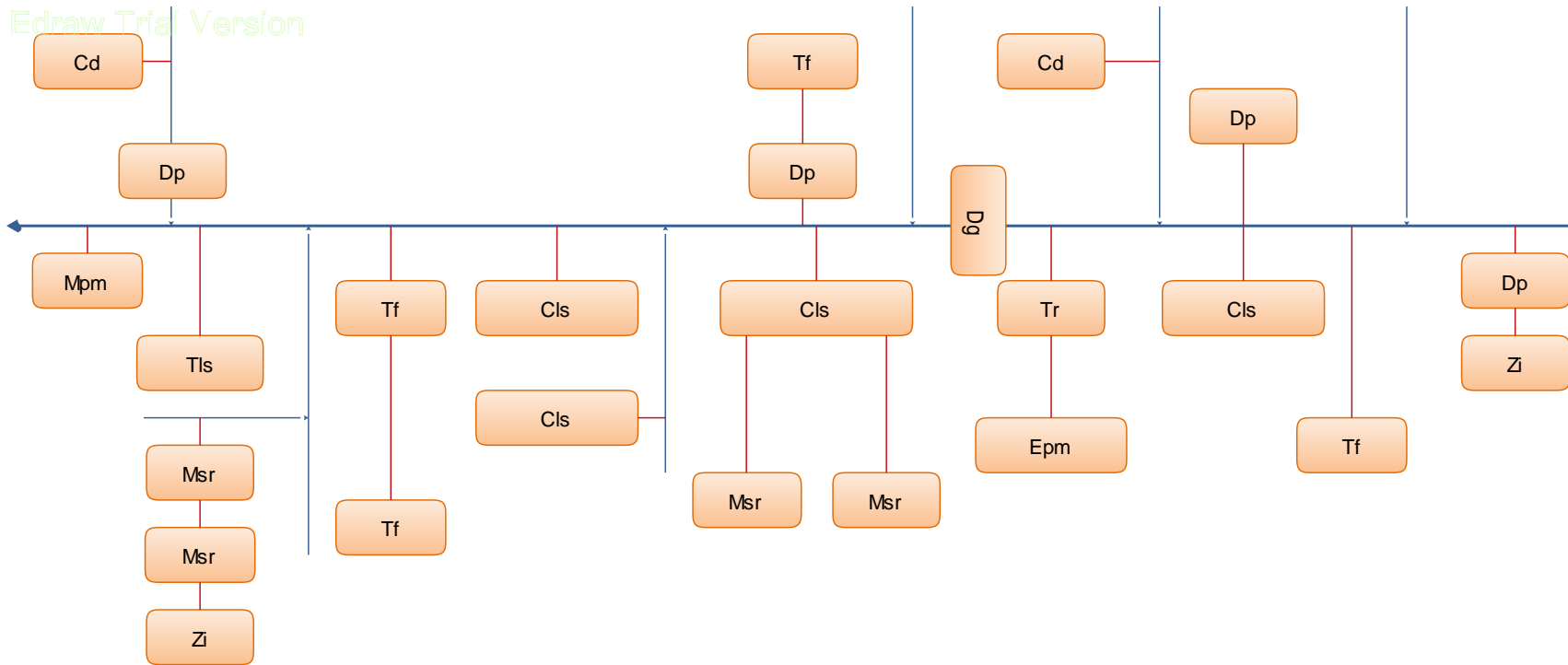
X: Riesgo por erosividad

0: Riesgo por deslizamientos

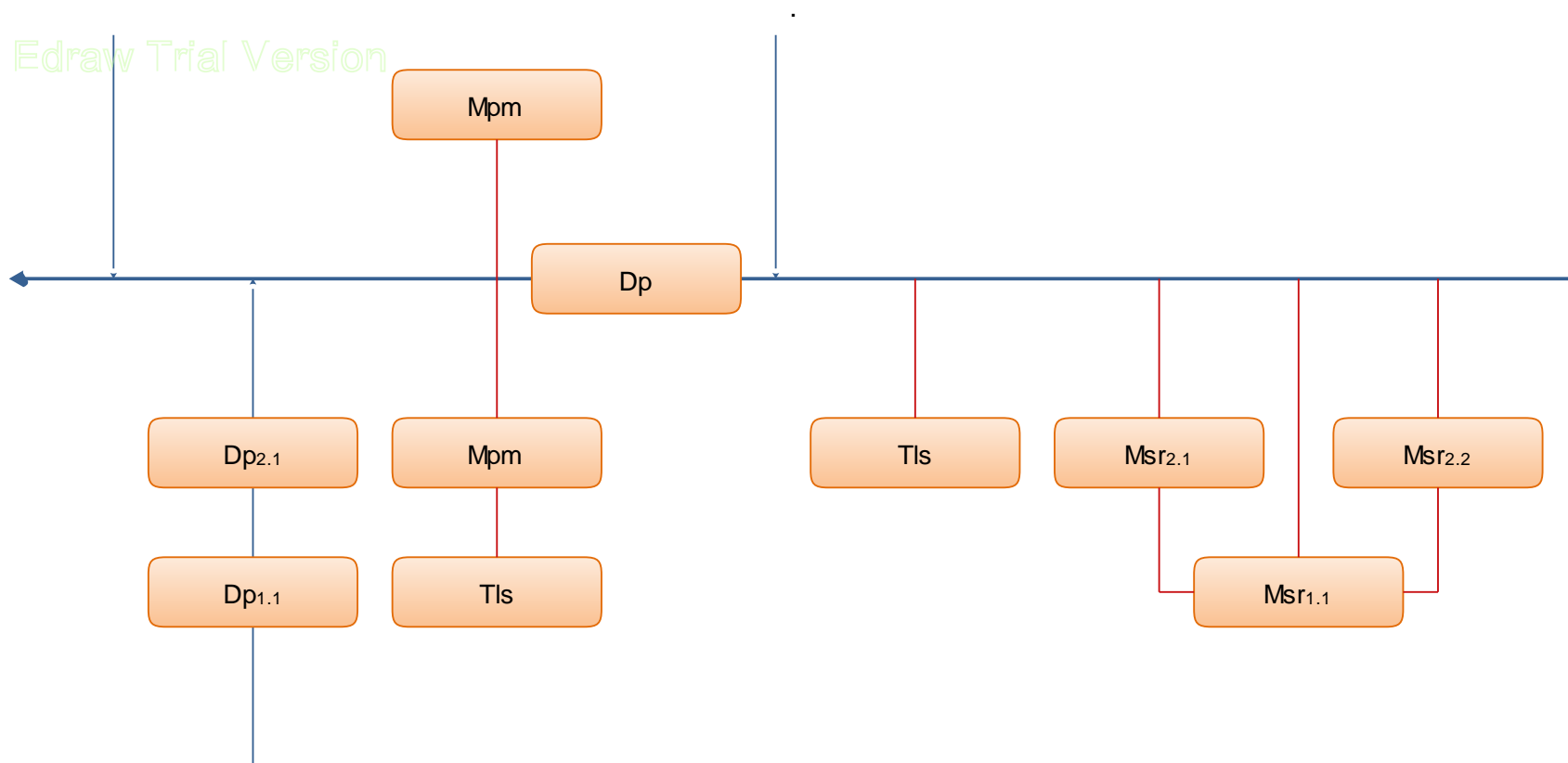
Por ejemplo, en el caso de la microcuenca 1, la fabricación de zanjas de infiltración hace que éstas trabajen como un todo, aumentando la superficie de captura de agua en las laderas. Los diques de postes se fabrican en cárcavas y funcionan conjuntamente evitando la erosión, situación que se observa en la microcuenca 3. En la microcuenca 2, la superposición de obras se efectúa en relación a elementos tales como la erosión, ladera, cercanía a un cauce, etc.... Los sacos de tierra se incorporan unos metros más debajo de donde se localizan las zanjas y en la ladera opuesta (en la cual la erosión creó cárcavas de gran tamaño) la incorporación de un sistema de diques de poste en conjunto con la reforestación del lugar permitió el crecimiento de una capa vegetal que hace que el sistema con el tiempo tenga la capacidad de resistir por si solo los procesos erosivos. La estructuración se efectúa en función del potencial y los objetivos de cada obra. Esta capacidad se hace interactuar con el objetivo puntual y con las condiciones propias del terreno; y lo más importante, en cercanía a los cauces de agua temporales que existen en las microcuencas. Tanto las zanjas, muros, terrazas, canales longitudinales, trabajan en forma independiente, pero globalmente configuran un complejo sistema que actúa como un todo, abarcando grandes extensiones en las microcuenca de trabajo.



**Figura 6.25. Modelo interconectado unilíneal de las obras de restauración hidrológico-forestal en la microcuenca 1.** Las obras de restauración en la microcuenca 1 solo se remiten a la presencia de zanjas de infiltración; estas a su vez se interconectan a través del cauce principal. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 6.26. Modelo interconectado unilineal de las obras de restauración hidrológico-forestal en la microcuenca 2.** Las obras de restauración en la microcuenca 2 son mas diversas en relación a la microcuenca anterior; la interacción conforma un modelo sistémico que se interconecta a través del cauce principal en el cual las obras básicamente impiden la sedimentación y reducen la energía cinética del agua. Con líneas azules la figura muestra los cauces de la microcuenca y en rojo la relación de la obra con los cauces; aunque esta relación no es siempre directa, establecen interacciones holísticas en que actúan como conjunto. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 6.27. Modelo interconectado unilineal de las obras de restauración hidrológico-forestal en la microcuenca 3.** Los nodos de conexión se establecen en el cauce principal que (al igual que en las microcuencas anteriores) relaciona en forma sistémica los elementos funcionales de las obra de restauración. Fuente: Elaboración propia.



### 6.3.1.3. Levantamiento del layout físico

El levantamiento del layout es eminentemente estructural, es decir, las tablas que se muestran a continuación indican donde van instaladas las obras de restauración en las microcuencas de trabajo. Para ello se georreferenciaron todas las obras de restauración hidrológico – forestal asignando una coordenada a cada obra. La instalación de las obras no es al azar, estas se instalan en función de los requerimientos funcionales en zonas previamente definidas en la cual cumplan a cabalidad o en forma optima la función para la cual se implementaron. En las cárcavas se implementaron diques de postes conjuntamente con sacos de tierra para complementar esta obra y permitir la colonización de flora arbustiva. Muchos diques se han integrado en forma optima al medio siendo completamente cubiertos con la vegetación; igual situación ha ocurrido con muchos sacos de tierra y algunas empalizadas.

SECTOR	OBRAS	PUNTO	GEOLOCALIZACION	
Microcuenca 1	Zanjas de infiltración	1.1	0268643 / 6236432	
Microcuenca 2	Zanjas de infiltración	2.1	0270032 / 6235817	
		2.2	0270583 / 6235656	
		Terraza forestal	2.3	0270086 / 6235796
			2.4	0270158 / 6235835
			2.5	0270128 / 6235940
			2.6	0270330 / 6235915
			2.7	0270500 / 6235700
			2.8	0270092 / 6235821
		Muro de infiltración con ripio	2.9	0270101 / 6235873
			2.10	0270282 / 6235760
	Muro de sacos rellenos	2.11	0270252 / 6235775	
		2.12	0270101 / 6235882	
	Tratamiento lineal de sacos	2.13	0270035 / 6235921	
		2.14	0270147 / 6236031	
		2.15	0270150 / 6235992	
		2.16	0270062 / 6235946	
		Dique de estructura gavionada	2.17	0270219 / 6235882
			Dique de postes	2.18
		2.19		0270412 / 6235836
		2.20	0270304 / 6235850	
		2.21	0270560 / 6235665	

**Tabla 6.7. Obras de restauración implementadas en las microcuencas de trabajo con la geolocalización respectiva.** Georreferenciación de las obras de restauración en las microcuencas. La disposición y el tipo de estas obras están en función de elementos como la topografía, erosión y objetivo de las mismas. Fuente: Elaboración propia.

Continuación tabla 6.7.

SECTOR	OBRAS	PUNTO	GEOLOCALIZACION
<b>Microcuenca 2</b>	Tranque	2.22	0270321 / 6235825
	Estructura de poste de madera	2.23	0270304 / 6235805
	Muro de postes de madera	2.24	0270144 / 6236025
	Canal de desviación	2.25	0270136 / 6236023
		2.26	0270319 / 6235987
	Canal longitudinal de sacos de tierra	2.27	0270434 / 6235904
		2.28	0270210 / 6235829
		2.29	0270129 / 6236019
		2.30	0270471 / 6235742
		2.31	0270200 / 6235800
		2.32	0270231 / 6235815
	<b>Microcuenca 3</b>	Muro de poste de madera	3.1
3.2			0270124 / 6235359
Dique de postes		3.3	0270120 / 6235375
		3.4	0270111 / 6235355
		3.5	0270155 / 6235343
Tratamiento lineal de sacos		3.6	0270125 / 6235361
		3.7	0270181 / 6235215
		3.8	0270136 / 6235355
		3.9	0270190 / 6235214
Muro de sacos rellenos		3.10	0270234 / 6235183
		3.11	0270240 / 6235155

La incorporación de solo zanjas de infiltración en las microcuencas 1 y 2, obedece a que el fin es la captura de agua para los procesos de reforestación allí implementados. Además la erosión en cárcavas alcanza niveles intensivos en la microcuenca 2, lo cual, implica la implementación de diques de postes; que fomenten la presencia de herbáceas impidiendo con ello la pérdida de suelo.

Por tratarse de una microcuenca testigo, no se ha efectuado el layout físico de la microcuenca 4, ya que, no se ha implementado ningún tratamiento en ella. Básicamente con el fin de servir como microcuenca control para efectuar análisis comparativo con las microcuencas en las cuales si se han efectuado labores de reforestación y restauración.

## 6.3.2. Formulación del diseño

### 6.3.2.1. Análisis funcional de los dispositivos

Los dispositivos de restauración hidrológico – forestal están ideados para cumplir requerimientos específicos en lo que respecta a tratamientos generales contra la erosión, como por ejemplo regulación de flujos hídricos, estabilización de taludes e incremento de la infiltración, entre muchas otras (Francke, et al, 2004). Para llevar a cabo esta tarea, los dispositivos deben cumplir con 4 condiciones básicas:

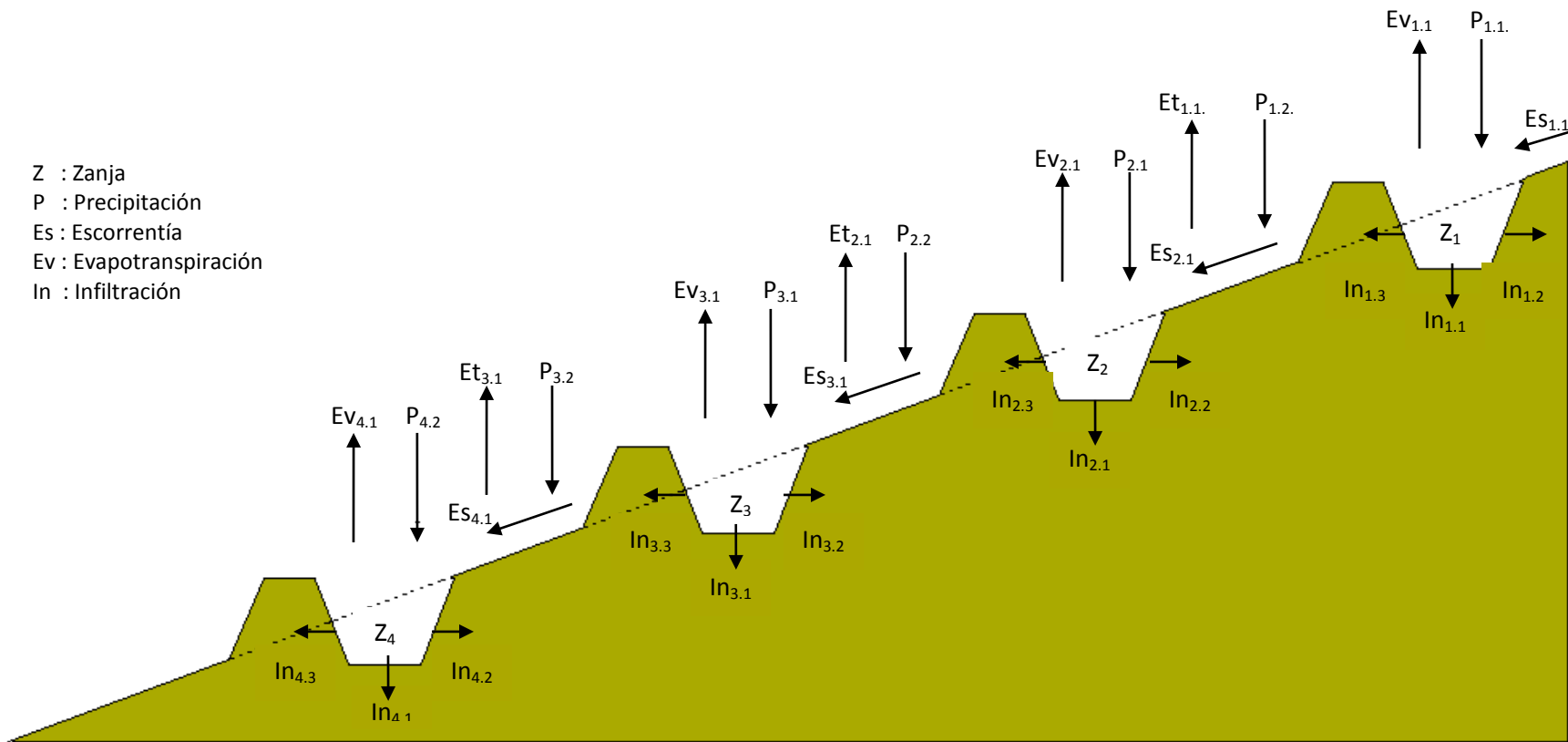
- Cumplir el requerimiento funcional específico
- Establecer entre ellas relaciones sinérgicas
- Adaptarse a las condiciones climáticas, topográficas y geomorfologías del la zona de implementación
- Adaptarse a las condiciones del medio ambiente integrándose estructural y funcionalmente a la ecología del lugar

Para cumplir con los puntos mencionados, debe entenderse a las obras de restauración (junto con su entorno) como sistemas abiertos de regulación negativa, en el cual, los subprocesos se encuentran dinámicamente relacionados en forma sistémica para lo cual interactúan 3 componentes: los flujos (entrada y salida), obra y componentes ambientales. Tomando lo anterior como fundamento holístico y eje central de la funcionalidad de las obras de restauración implementadas en las microcuencas de trabajo, se analizará en este apartado a las zanjas de infiltración, diques de postes y gaviones, dado que son estructuras básicas del trabajo efectuado en Alto Loica.

Las zanjas de infiltración funcionan básicamente como un sistema, en el cual, se implementa más de una zanja por ladera aumentando con ello la cantidad de agua “cosechada”. Además, esta obra tiene una gran importancia en el control del escurrimiento y en la reducción de la erosión hídrica (Tapia, et al, 2008), lo cual se evidencia en la gran acumulación de sedimento dentro de las zanjas.

Funcionalmente hablando, se identifican diversas corrientes de entrada y salida del sistema basado principalmente en los flujos de agua, ya que, este es el elemento ambiental interactuante con la obra. La entrada de agua al sistema se efectúa principalmente por las precipitaciones diferenciándose en dos formas: precipitación incidente o precipitación parcial (que ingresan directamente a la zanja) y escorrentía superficial (proveniente de la precipitación cuando hace contacto con el suelo). La escorrentía está dada por la cantidad de agua caída en los sectores “interzanjas” debido a que la presencia del camellón y las dimensiones de la zanja están en función del “periodo de retorno” y del “caudal máximo” motivo por el cual se evita que las zanjas de rebalsen y erosionen los sectores ladera abajo. Las corrientes de salida a su vez se diferencian en evaporación e infiltración.

La evaporación depende de múltiples factores como por ejemplo la tasa de evaporación del suelo, la homeostasis del entorno, la temperatura ambiental y la incidencia de la luminosidad solar. Estos elementos se conjugan para establecer los flujos de evapotranspiración en los distintos sectores, ya sea, en la zanja misma o en los sectores “interzanjas” (en este último será directamente proporcional a la distancia de una zanja y otra).



**Figura 6.28. Esquema de zanjas de infiltración con corrientes de entrada y salida.** Las zanjas de infiltración funcionan como un sistema en el cual se captura el agua de las precipitaciones aumentando con ello la infiltración y el abastecimiento de las napas freáticas. En el balance total participan corrientes de entrada y salida dados por el ciclo hidrológico, en el cual, influyen procesos como la evaporación y la evapotranspiración, la cual, depende de la cobertura y las especies vegetales. La infiltración a su vez, está dada por las características intrínsecas del suelo. Fuente: Elaboración propia.

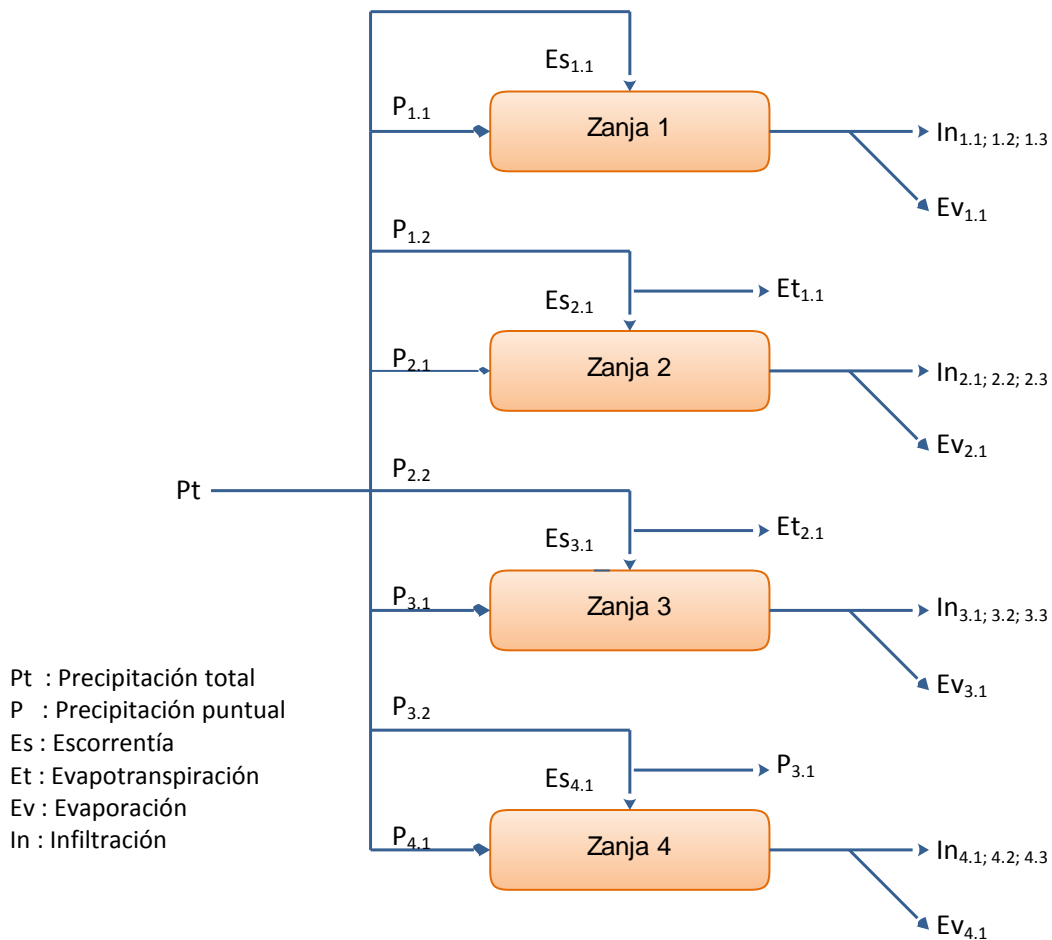
La corriente de salida más importante del sistema de zanjas la constituye la infiltración ( $In_{x,y}$ ), la cual, depende de factores como textura, estructura y compactación del suelo, entre otros. Tapia y colaboradores (2008) describe la siguiente ecuación para determinar la velocidad de infiltración.

$$Vi = \frac{Dh \times 600}{t}$$

Donde,

$Vi$  = Velocidad de infiltración (mm/h)  
 $Dh$  = Diferencial de altura de agua (cm)  
 $t$  = Diferencial de tiempo (min)

Mientras mayor sea el valor de  $Vi$ , mayor, se evitará la pérdida de agua por evaporación y por ende habrá un mayor abastecimiento de las napas freáticas, aumentando a su vez la cantidad de agua disponible para las plantas.



**Figura 6.29. Modelo de cajas del sistema de zanjas de infiltración.** Los flujos de entrada al sistema están dados por las precipitaciones, en este caso, por la precipitación puntual ( $P_{x,y}$ ) que cae específicamente en las zanjas y las precipitaciones que generan las escorrentías superficiales que contribuyen a su abastecimiento. Las salidas del sistema están dadas por la evaporación, evapotranspiración y la infiltración. Fuente: Elaboración propia.

Las fuerzas que actúan sobre un dique se clasifican en estabilizantes y desestabilizantes (Rodríguez, 2004). Las fuerzas estabilizantes son básicamente el peso propio de la estructura y la componente vertical del empuje hidrostático (entre otras). Las fuerzas desestabilizantes en cambio, están conformadas por la componente horizontal del empuje hidrostático y las fuerzas dinámicas (flujo rápido de la corriente, choque de los materiales arrastrados, movimientos sísmicos).

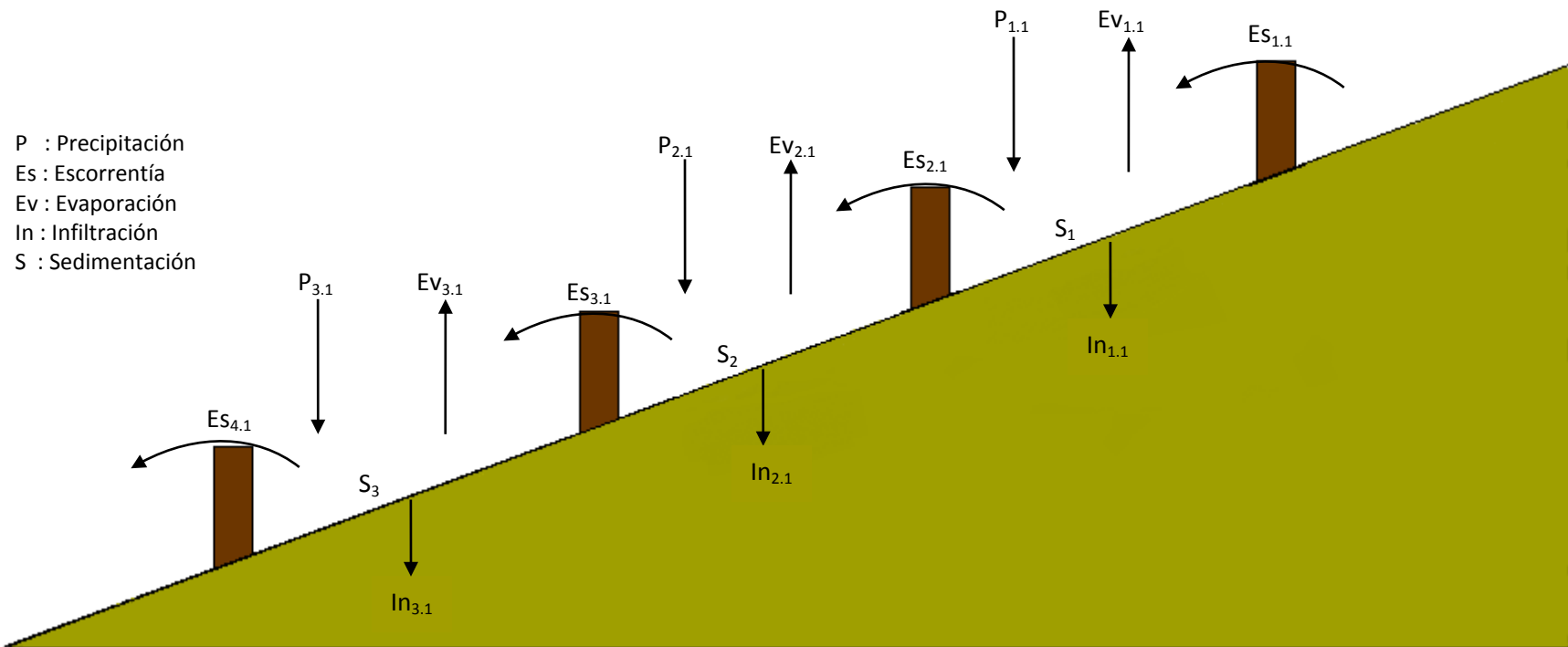
Funcionalmente hablando, los diques de postes se construyen de preferencia en las cárcavas para evitar la acción continua de la erosión y la pérdida de material debido a la escorrentía superficial. Cuando esto ocurre, la erosión se cataloga como muy severa acabando con los primeros horizontes de suelo, llegando en algunos casos hasta el horizonte C. Las cárcavas son la consecuencia de la erosión hídrica que se produce cuando por acción antrópica, la deforestación hace perder al suelo su protección frente a la gota de lluvia perdiendo además su capacidad de impedir el arrastre de material.

Un dique de postes por sí solo no impiden en sí la pérdida de material en el suelo; su funcionalidad se basa en que en una determinada cárcava se debe implementar más de un dique, los cuales no actuarán en forma independiente, sino que, en conjunto actúan como un gran sistema cuyo fin se centra en que los sedimentos que arrastra el agua se depositan en la zona “interdique”, de tal forma que lo que erosiona es igual a lo que se deposita (De Simón, et al, 1998). Para que esto último se lleve a cabo, necesariamente implica que debe existir más de un dique en cárcavas donde la erosión sea muy severa, salvo en algunos casos en que exista algún revestimiento vegetal (considerando también el tamaño de la cárcava), basta solo con un solo dique. Esto último se complementa además con otros requerimientos como un sistema de sacos de tierra en los sectores superiores para impedir el desprendimiento de tierra en los sectores aledaños durante los eventos pluviométricos y la implementación de biotecnias para lograr una capa vegetal que evite el efecto de la gota de lluvia.

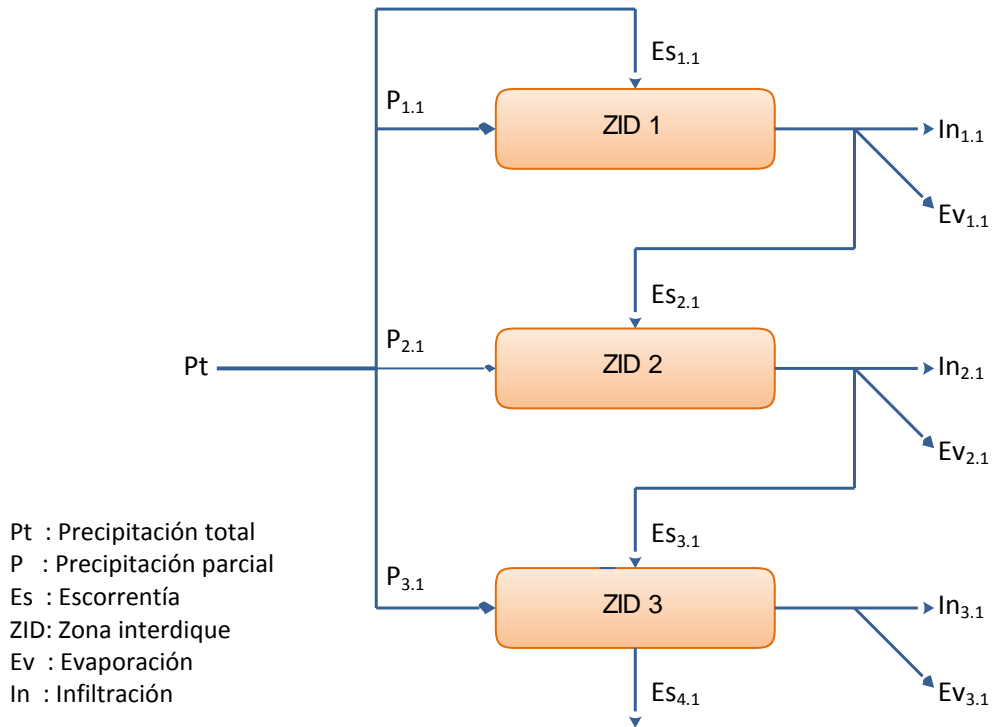
Los flujos de entrada al sistema consideran dos corrientes; la precipitación efectiva y la escorrentía superficial. El primero, incide directamente en las zonas interdiques y la escorrentía superficial se genera por el agua que alcanza los cauces primarios en las zonas superiores de la microcuenca. Los flujos de salida en cambio, están dados por la escorrentía, la evaporación y la infiltración.

La escorrentía y la precipitación directa contribuyen a la colmatación en el dique superior, aumentando la energía potencial del agua, sin embargo, la implementación de un dissipador en cada dique disminuye su poder erosionador produciendo la sedimentación en la parte baja de cada dique. La colmatación de los diques contribuye además a aumentar las fuerzas desestabilizantes, las que disminuyen por la estructuración de un dique respecto a otro; esto significa que el pie de un dique superior debe estar en línea horizontal con la parte superior del dique que está en la zona inferior y así sucesivamente con los diques que estén hacia abajo.

Si bien, los diques se utilizan para zonas de escorrentía temporal (solo para eventos de lluvia en periodos invernales, considerando la zona central), no son recomendables para suelos muy arcillosos y poco agregados. Además la pendiente contribuye a la funcionalidad del sistema siendo más efectiva cuando esta no sobrepasa los 100 %.



**Figura 6.30. Esquema de diques con corrientes de entrada y salida.** A diferencia de las zanjas de infiltración, los procesos se producen en las zonas inter-obras (en este caso entre los diques y no “en”, como en las zanjas), esto debido a que aparecen procesos como la sedimentación, ya que, el arrastre de material en un sector genera la sedimentación en el sector de más abajo. Esto tiene como fin disminuir la erosión y pérdida por arrastre en procesos hídricos. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 6.31. Modelo de cajas de sistema de diques.** La figura indica las corrientes de entrada y salida del sistema de diques. Las entradas corresponden a las precipitaciones y las escurrimientos que ingresan a las zonas de procesos (donde ocurre la sedimentación) dadas por las zonas entre diques (cajas ZID) y las salidas están dadas por la escurrimiento, la infiltración y la evaporación. Fuente: Elaboración propia.

Respecto de los flujos de entrada y salida en el caso de los gaviones, existe un grado de complejidad menor que en las zanjas y los diques de postes. Esto significa que los flujos que alimentan el sistema tienen una interconexión menor, debido a que las zanjas y diques funcionan en conjunto en forma armónica y sistémica en comparación al gavión cuya función es distinta.

En Alto Loica, los gaviones se implementaron en cauces temporales, por lo que estos, responden solo en etapas de eventos pluviométricos. Esto implica la lluvia alimenta al caudal en dos formas: (a) precipitación efectiva y (b) escurrimiento superficial. Ambos flujos con origen en común, contribuyen a la formación del caudal con los subsecuentes fenómenos que esto implica. La infiltración que se efectuó en el área misma del cauce estará determinada por la pendiente, velocidad del flujo y las características del suelo; a su vez, la evaporación también estará contemplada como corriente de salida aunque con una tasa menor.

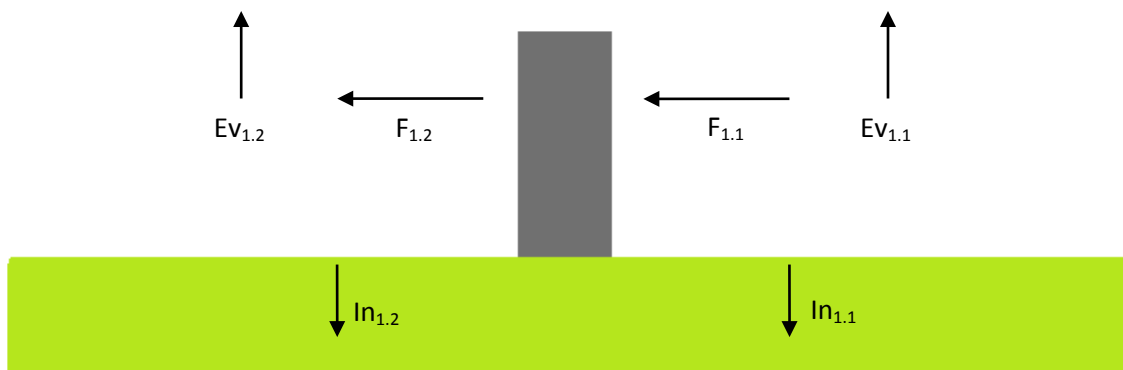
La excesiva velocidad del agua contribuye a la erosión de los márgenes del cauce ocasionando el desprendimiento y arrastre de material de los primeros centímetros del suelo. Por esto la velocidad del agua, es un factor potencialmente erosionador en los cauces y más aun si se conjugan otros elementos como la pendiente, aumentado con ello la energía cinética del agua.



Para diferentes caudales existirá una velocidad máxima de erosión en función de la composición y constitución del suelo que forma parte del lecho del cauce. “La velocidad del agua en un canal no puede superar el valor que resiste el material que lo constituye sin que se produzcan erosiones (Rodríguez, 2004). En la tabla que se indica a continuación se indican las velocidades máximas que debe tener un flujo de agua antes de alcanzar el potencial de erosión.

Tipo de suelo	Velocidad (mt /seg)
Arena Fina	0,40
Arcilla arenosa	0,50
Arcilla pura, limo de aluvión no coloidal	0,60
Arcilla ordinaria, grava fina	0,70
Limo de aluvión coloidal, mezcla de grava, arena y arcilla	1,00
Grava gruesa	1,20
Cantos y gravas	1,50
Esquistos tiernos	1,80
Rocas estratificadas	2,40
Rocas duras	4,00
Hormigón	4,50

**Tabla 6.8. Velocidades de erosión.** Uno de los factores que incide en la erosión por parte de un flujo de agua es la velocidad de ésta. La capacidad de erosionar estará directamente relacionada con las características del suelo, por lo que la velocidad en un tipo de suelo, no tendrá el mismo potencial erosionador que en otro tipo. Las velocidades máximas de potencial erosión se indican en la tabla. Fuente: Rodríguez, 2004.

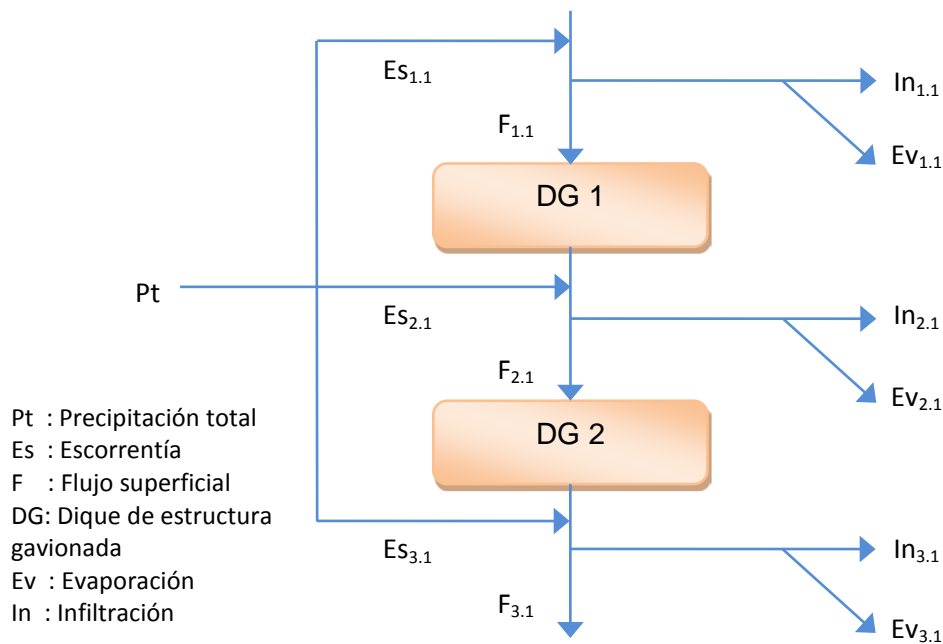


**Figura 6.32. Esquema de estructura gavionada.** Los procesos involucrados en las estructuras gavionadas consisten en flujos de agua que siguen el curso de las flechas indicadas en la figura. En un cauce existen 3 flujos básicos, la infiltración ( $In_x$ ), evaporación ( $Ev_x$ ) y flujo principal ( $F_x$ ), que en el caso de un cauce con gavión cambia ( $F_{1,1}$ ) su energía cinética ( $F_{1,2}$ ) debido al impacto del flujo con la obra gavionada disminuyendo con ello su potencial de erosión. Fuente: Elaboración propia.

Dada la importancia de esto último, la construcción del gavión implica una reducción de la velocidad de agua, disminuyendo su energía cinética y por ello disminuyendo su potencial erosivo, bajando la velocidad e impidiendo que esta alcance la velocidad máxima que implique el arrastre de material.

La figura anterior indica los flujos de agua que están implicados en el gavión, siendo el flujo de entrada ( $F_{1,1}$ ) de una energía mayor al flujo al salida del sistema ( $F_{1,2}$ ). DE la misma forma los flujos de salida del sistema se aprecian como evaporación e infiltración, dándose un detalle de ellos en el modelo de cajas del sistema.

Otra consideración importante es que el gavión impide no solo la pérdida de material, sino que conjuntamente con ello, impide o reduce la formación de sedimento producido por el arrastre de material proveniente de los márgenes del cauce (Rodríguez, 2004), aunque, distinto es el caso en que el material provenga conjuntamente con la escorrentía generada por la pérdida de biomasa vegetal en los sectores aledaños al cauce sobretodo en las zonas altas de la cuenca. Si el agua arrastra material sólido, conviene que éste no se sedimente en el canal, para ello hay que considerar las velocidades por debajo de las que se sedimentan dichos elementos sólidos.



**Figura 6.33. Modelo de cajas de sistema de “Diques de estructura gavionada” (Gaviones).** La figura indica las corrientes de entrada y salida del sistema de gaviones. Las entradas corresponden a las precipitaciones y las escorrentías que ingresan al cauce; las salidas están dadas por la infiltración y la evaporación. Cada flujo de entrada y salida está numéricamente diferenciado para distinguir la zona donde ocurre. Fuente: Elaboración propia.

### 6.3.2.2. Protocolos de implementación

#### a) Zanja de infiltración

Las zanjas de infiltración están diseñadas para zonas con estaciones marcadas en zonas con pendiente y de preferencia en suelos no arcillosos dando resultados óptimos en suelos graníticos de uso forestal. La capacidad volumétrica total de las zanjas debe ser igual o superior a toda la escorrentía superficial o caudal máximo estimado (Tapia, et al, 2008).

Para ello es imprescindible que la zanja se planifique y construya en función de las precipitaciones y caudales de la zona específica para evitar su desborde y por ende, evitar los procesos erosivos por escorrentía, por ello, Tapia y colaboradores proponen las siguientes ecuaciones para la funcionalidad de las zanjas: el caudal punta se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$Q_{esc} = \frac{C \times I \times A \times K}{360}$$

Donde:

$Q_{esc}$  = Caudal punta ( $m^3/seg$ )

C = Coeficiente de Escorrentía (valor adimensional, por tabla)

I = Máxima intensidad media de precipitaciones en 1 hora para el período de retorno determinado ( $mm/h$ )

A = Área ( $ha$ )

K = Coeficiente corrector de seguridad para cuencas pequeñas 1.2 (adimensional).

A su vez, la precipitación efectiva se calcula mediante:

$$Pe = C \times I \times K$$

Donde:

C = Coeficiente de Escorrentía (valor adimensional por tabla)

I = Máxima intensidad media de precipitaciones en 1 Hora para el mismo período de retorno ( $mm/hora$ )

K = Coeficiente corrector de seguridad para cuencas pequeñas. 1.2 (adimensional)

El diseño de la estructura considera varios aspectos. En primer lugar, para el diseño de una protección superficial deberá elegirse un material que resista la velocidad del agua y anclarse la estructura en el terreno de modo que se impida su socavación. Otro aspecto a considerar es que este tratamiento se emplea en zonas semiáridas debido a que el flujo directo representa el componente principal del flujo hídrico total. A través de esta técnica se regulan los volúmenes de escorrentía superficial y se almacenan o “cosechan” aguas para el riego.

Las zanjas deben tener una disposición intercalada, en función de la eventualidad que los volúmenes de escorrentía superen la capacidad de almacenaje de las zanjas, produciéndose el rebalse en éstas (Tapia, et al, 2008). Si diseño contempla además que estas deben ser discontinuas con un tabique de separación y un camellón en la zona dispuesta en dirección de la ladera. Esta discontinuidad está en función de los requerimientos de la zanja y contribuye a maximizar su eficiencia y minimizar los impactos

que se generen en ella. Este aspecto es importante en su diseño por lo que se contempla de la siguiente forma:

El distanciamiento horizontal de zanja se calcula mediante las siguientes ecuaciones:

a) sin área de tabiques:

$$D = \frac{1000 \times Vz}{L \times Pe}$$

Donde,

D: distanciamiento horizontal (m)

Vz: Volumen de la zanja

L: largo de la zanja

Pe: precipitación efectiva (mm/h)

Distribución espacial de las zanjas en el terreno y medición del largo total de las zanjas y de los tabiques. Consideración según terreno de área principal y de área de primera y segunda líneas de zanjas.

b) Considerando área de tabiques

$$D' = \frac{Lz \times D}{Lz + Lt}$$

Donde,

Lz: Largo de la zanja (m)

Lt: Largo tabique (m)

Para tabiques distintos:

$$D' = \frac{Ltz \times D}{Ltz + Ltt}$$

Donde,

D': distanciamiento horizontal con tabique

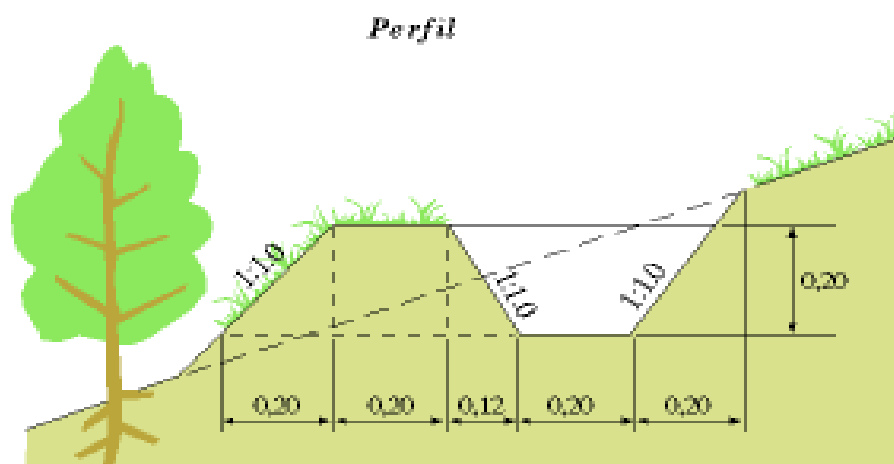
Ltz: largo total de las zanjas (m)

Ltt: largo total de los tabiques (m)

Todo lo anterior implica que: Volumen Total de Zanjas > Caudal Máximo (Tapia, et al, 2008).

La sección transversal de la zanja se representa a través de un trapecio que tiene las siguientes dimensiones: -0.2 m. de ancho en la base- -0.52 a 1 m. de ancho en la parte superior- -0.2 a 0.4 m. de profundidad- -1:1.0 de pendiente lateral superior - y - 1: 0.6 de pendiente lateral inferior -. La sección del camellón corresponde a 0.2 m. de ancho en la parte superior y 1:1.0 de pendiente lateral (Francke, et al, 2004).

Las zanjas pueden tener un largo que varía entre 2.5 y 5 m., separadas por intervalos horizontales de 0.5 m.



**Figura 6.34. Perfil de diseño de la zanja de infiltración.** Se construye transversalmente a la pendiente, en la curva de nivel. La obra comprende un conjunto de zanjadas continuas o individuales. Fuente: Francke, et al, 2004

La ejecución de la obra contempla los siguientes pasos:

- Decidir el intervalo vertical entre zanjadas en función de la pendiente de la ladera (desde 3 m. en pendientes moderadas a 0.8 m. en pendientes escarpadas)
- Excavar la zanja (0.2 m. de ancho en la base, lo que corresponde al ancho de una pala)
- Hacer el camellón y compactar moderadamente el suelo
- Realizar la siembra de pastos en el camellón
- Proteger la siembra con algún tipo de cubierta.

Esta obra está diseñada para capturar y almacenar la escorrentía procedente de las cotas superiores. Se construye transversalmente a la pendiente, en la curva de nivel. La obra comprende un conjunto de zanjadas continuas o individuales en tresbolillo. Presenta una sección con un ancho mínimo en la base de 0,2 metros, una altura efectiva mínima en la cara inferior de 0,2 metros. Al construirse zanjadas individuales en tresbolillo el largo fluctúa entre 3 y 8 metros y la separación o tabique entre zanjadas, en la curva de nivel, varía entre 0,7 y 7 metros, según la altura y largo de ellas. Si las zanjadas son continuas, en un rango de 5 a 15 metros se deberá dejar un tabique de 0,3 metros sin construir. Aguas abajo, adyacente a la excavación, se construye un camellón de altura y ancho similares a la profundidad de la zanja y a la anchura superior de la obra, respectivamente. Se excluye la construcción de zanjadas en suelos no estructurados (Francke, et al, 2004)

<b>Materiales</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Especificaciones</b>
Semillas	9,6	Gr	20 gr/m <sup>2</sup> : 0,48 m <sup>2</sup>

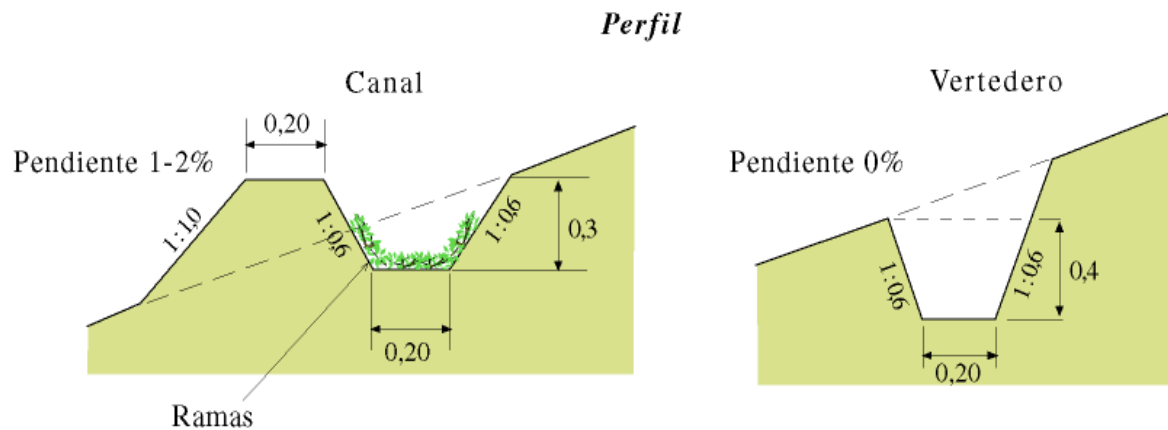
**Tabla 6.9. Materiales para la zanja de infiltración.** La cantidad está indicada para metro de zanja, con una pendiente de 25 %. Fuente. Francke, et al, 2004.

## b) Canal de desviación

Esta técnica resulta útil para regular el gran volumen del flujo directo o de la escorrentía superficial en las zonas semiáridas. La ejecución se realiza sobre la cabecera de las cárcavas y/o en laderas con riesgos de erosión creciente. En cabeceras de cárcavas se recomienda la realización de un canal que desvíe las aguas para ambos lados, de tal forma de disminuir la descarga en ambos vertederos. Los vertederos deben construirse en laderas estabilizadas con presencia de vegetación (Francke, et al, 2004)

El canal debe tener como máximo 50 m. de largo y una pendiente del 1 al 2%. La sección transversal del canal la representa un trapecio con las siguientes dimensiones: 20 cm. de ancho en la base 56 cm. de ancho en la parte superior 30 cm. de profundidad y 1: 0.6 de pendiente lateral-.

Se disponen ramas para disminuir la velocidad del flujo. Se aprovecha la tierra excavada y se realiza un camellón en el borde inferior donde se siembran pastos. (Francke, et al, 2004)



**Figura 6.35. Perfil de diseño del canal de desviación.** Se construye transversalmente a la pendiente con un ligero desnivel (1%) para transportar el agua a una salida estabilizada. Presenta una sección con un ancho mínimo en la base de 0,2 metros y una altura efectiva mínima de 0,2 metros, Fuente: Francke, et al, 2004.

El vertedero tiene 10 m. de largo, una pendiente de 0° y sin camellón. La sección del vertedero la constituye un trapecio con las siguientes dimensiones: -20 cm. de ancho en la base- -68 cm. de ancho en la parte superior- -40 cm. de profundidad- y -1: 0.6 de pendiente lateral (Francke, et al, 2004).

La ejecución de la obra contempla los siguientes pasos:

- Excavar el canal
- Hacer el camellón y compactar moderadamente el suelo
- Excavar el vertedero
- Realizar la siembra de pastos en el camellón
- Proteger la siembra con algún tipo de cubierta.



Para disminuir las filtraciones la parte posterior de los postes horizontales debe cubrirse con sacos de yute. La estabilidad de la estructura y la regulación del flujo hídrico se aumentan con un muro de sacos de malla sombra rellenos de tierra, que se construye en la parte posterior del dique. Posteriormente, se rellena el depósito del dique hasta el nivel del vertedero, aproximadamente 1 m. desde el dique aguas arriba. Finalmente se compacta y se construye el canal de sacos de tierra. El dissipador tiene una superficie de 1 m<sup>2</sup> y puede realizarse con madera de pino impregnada, bolones o estructuras gavionadas (Francke, et al, 2004).

La ejecución de la obra contempla los siguientes pasos (Francke, et al, 2004):

- Excavar los empotrados
- Perforar los hoyos para los postes verticales
- Estacar los postes verticales
- Colocar, alambrear y clavar los postes horizontales
- Realizar el vertedero en los postes horizontales
- Corchetear los sacos de yute detrás de los postes horizontales
- Realizar un muro de sacos de tierra detrás de los postes horizontales
- Rellenar con tierra 1 m. aguas arriba y compactarla detrás del muro de sacos anterior
- Construir un canal con sacos rellenos de tierra
- Construir el dissipador del dique aguas abajo.

<b>Materiales</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Especificaciones</b>
Postes	10	U	Largo: 2,40 mt; Diámetro: 4"
Alambre	3,2	Kg	N° 14
Clavos	1,6	Kg	5"
Sacos de yute	8	U	
Sacos de malla	87	U	60 % cobertura; 0,6 x 0,4 mt
Grapas	0,6	Kg	1,5"

**Tabla 6.11. Materiales para el dique de postes.** Los materiales están considerados para cada metro de canal. Una unidad tiene una distancia de 20 metros con una pendiente de 0% en los últimos 10 metros y una pendiente de 25 % en sus inicios. Fuente. Francke, 2004.

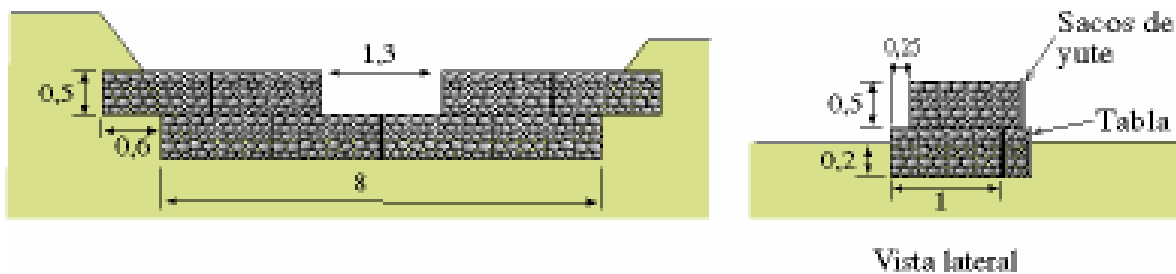
Básicamente, el dique es para el control de cárcavas y de cursos de agua secundarios, generalmente temporales, tales como arroyos y quebradas, que actúa por resistencia mecánica. Consiste en una estructura de postes verticales impregnados y horizontales de una altura efectiva entre 0,5 a 1,5 metros. Los postes verticales se entierran entre 0,5 a 1 metro, según el tipo de suelo y se distancian entre 0,5 y 1,2 metros (Francke, et al, 2004).



Los postes horizontales deben empotrarse entre 0,3 a 0,6 metros en el fondo y lateralmente. En la parte posterior del dique para aumentar la capacidad de retención de sedimentos, se coloca una malla de polietileno "tipo malla sombra" (80% de cobertura como mínimo) u otra de similar calidad. Para proteger la estructura de un eventual socavamiento, se construye un pequeño terraplén en su parte posterior. En diques con altura efectiva superior a 1,5 y hasta 3 metros, se deberá colocar tirantes de alambre anclados y rellenar de acuerdo a las necesidades de la obra. Para evacuar la descarga, de acuerdo con el caudal máximo estimado, se construye un vertedero de sección trapezoidal, generalmente con un largo entre 1/4 a 1/5 de la longitud del dique y de 0,2 a 0,4 metros de altura. Finalmente, para amortiguar el golpe de las aguas vertidas se construye un dissipador de energía de longitud 1,3 a 1,5 veces la altura efectiva de la obra (Francke, et al, 2004).

#### d) Dique de estructuras gavionadas

Este tratamiento permite regular los flujos hídricos en cauces medianos y mayores, debido a su gran resistencia en períodos de crecidas. Se pueden realizar conjuntamente dissipadores, diques y estructuras de defensa fluvial. En términos generales las dimensiones de un gavión corresponden a 2 m. de largo  $\times$  1 m. de ancho  $\times$  0.5 m. de alto. Los objetivos y características de la obra definirán la disposición de los gaviones. Si se trata de un dique o dissipador se excavará en el cauce hasta encontrar una capa impermeable. Si no se encuentra se deberá nivelar y compactar firmemente el suelo. La primera corrida de gaviones debe enterrarse en el lecho, a un mínimo de 20 cm. La segunda corrida se dispone sobre la primera, aunque sólo en los extremos, lo que conforma el vertedero hacia el centro. Las caras anteriores de los gaviones deben cubrirse con sacos de yute o ramas para disminuir la filtración de los sedimentos. Si los objetivos apuntan a regular los impactos laterales del flujo, se debe excavar el área de contacto de lecho y talud. Se procede de la misma forma anterior, exceptuándose que la segunda corrida de gaviones debe ser continua, sin vertedero y se dispone a 10 cm. más al interior del talud que la primera (Fuente: Francke, et al, 2004)



**Figura. 6.37. Diseño de estructuras gavionadas.** La primera corrida de gaviones debe enterrarse en el lecho, a un mínimo de 20 cm. La segunda corrida se dispone sobre la primera, aunque sólo en los extremos, lo que conforma el vertedero hacia el centro. Fuente: Francke, et al, 2004.

La ejecución de la obra contempla los siguientes pasos:

- Excavar la base del cauce, nivelar y compactar
- Disponer la primera corrida de gaviones
- Colocar los sacos de yute en la cara interior de aguas arriba los gaviones.
- Rellenar los gaviones con bolones.
- De acuerdo con los objetivos de la obra, se dispone la segunda y sucesivas corridas de gaviones.

Esta estructura se sustenta por su propio peso y actúa por resistencia mecánica. Consiste en un conjunto de paralelepípedos fabricados con malla hexagonal en alambre de acero galvanizado y relleno con piedras. La altura, largo y ancho de la obra se calculará según las condiciones del terreno y el tipo de relleno del gavión. La altura máxima para obras de mampostería gavionada fluctúa entre 2 a 3 metros. La utilización de bases antisocavantes se evaluará según las necesidades específicas (Francke, et al, 2004).

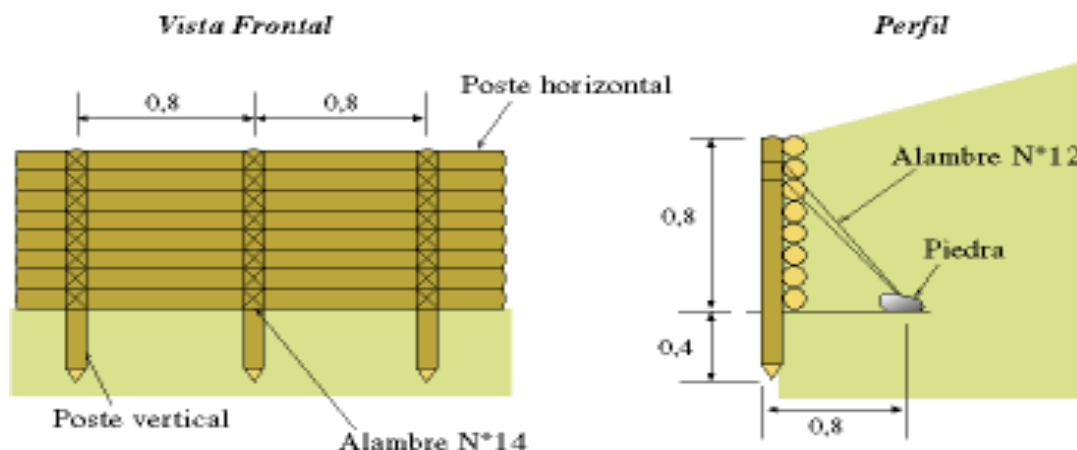
Cuando la obra de gaviones corresponda a un dique, los gaviones deben ser enterrados entre 0,25 y 0,6 metros y empotrados en los taludes laterales entre 0,4 y 0,6 metros, según el tipo de suelo. Para aumentar la capacidad de retención de sedimentos, la cara aguas arriba de los paralelepípedos se cubre con un tipo de "malla sombra" de polietileno (mínimo 80% de cobertura) u otra de similar calidad. Para proteger la estructura de un eventual socavamiento, se construye un pequeño terraplén en su parte posterior. Para evacuar la descarga, de acuerdo con el caudal máximo estimado, y amortiguar el golpe de las aguas vertidas, se construye un vertedero de sección trapezoidal o rectangular de aproximadamente 1/4 a 1/5 de la longitud del dique y un dissipador de energía de longitud 1,4 a 1,7 veces la altura efectiva de la obra, respectivamente (Fuente: et al, 2004).

<b>Materiales</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Especificaciones</b>
Gaviones	8	U	Alambre recubierto 2 x 1 x 0,5 m
Bolones	9	m <sup>3</sup>	
Sacos de yute	8	U	
Tablas	5	U	Largo: 3,2 m; ancho 3/4"

**Tabla 6.12. Materiales para los gaviones.** Los materiales están considerados para cada metro de canal. Una unidad tiene una distancia de 20 metros con una pendiente de 0% en los últimos 10 metros y una pendiente de 25 % en sus inicios. Fuente. Francke, et al, 2004.

#### **e) Muro de poste de madera**

A través de este tipo de tratamientos se pueden estabilizar áreas inestables de taludes, de cauces y de cárcavas, así como también amortiguar el impacto lateral de flujos hídricos en cursos de agua. Este tipo de muro se puede realizar con distintos tipos de madera. Se recomienda utilizar postes de pino impregnados para aumentar la vida útil a períodos superiores a 10 años. Se construye con postes dispuestos en sentido vertical y horizontal. Los postes verticales tienen 1.2 m. de largo, se entierran a 40 cm. de profundidad con intervalos de 80 cm. Los postes horizontales se unen entre sí a media madera en forma de L y se rematan con clavos y alambre. Después se clavan y alambran en la parte posterior de los postes verticales. Para aumentar la resistencia del muro y contrarrestar la presión del terreno sobre aquel, se colocan tirantes de alambre, en ángulo de 45°, anclados a un bolón o estacas en el talud. Para disminuir la pérdida de suelo en la parte posterior del muro se corchetean sacos de yute. En el espacio remanente entre talud y muro se rellena con tierra (Fuente: Francke, et al, 2004).



**Figura 6.38. Diseño de muro de poste de madera.** Se construye con postes dispuestos en sentido vertical y horizontal. Los postes verticales tienen 1.2 m. de largo, se entierran a 40 cm. de profundidad con intervalos de 80 cm. Los postes horizontales se unen entre sí a media madera en forma de L y se rematan con clavos y alambre, Fuente: Francke, et al, 2004.

La ejecución de la obra se efectúa según los siguientes pasos (Francke, et al, 2004):

- Emparejar el talud
- Rellenar canalículos
- Excavar el talud en el nivel de base del muro
- Colocar los postes verticales
- Unir postes horizontales entre sí con clavos y alambre
- Clavar y alambrear postes horizontales a los postes verticales
- Corchetear sacos de yute en la parte posterior del muro
- Colocar tirantes hacia el talud
- Rellenar con tierra el espacio entre muro y talud.

Materiales	Cantidad	Unidad	Especificaciones
Postes	40	U	Diámetro: 0,1 mt; Largo: 2,40 mt
Estacas	7	Kg	N° 12, galvanizado, 150 mt; 21,4 mt/kg
Alambre	0,69	Kg	N° 14, galvanizado, 25 mt; 36,3 mt/kg
Clavos	133	U	5"
Piedras	12,5	U	Diámetro: 0,3 mt

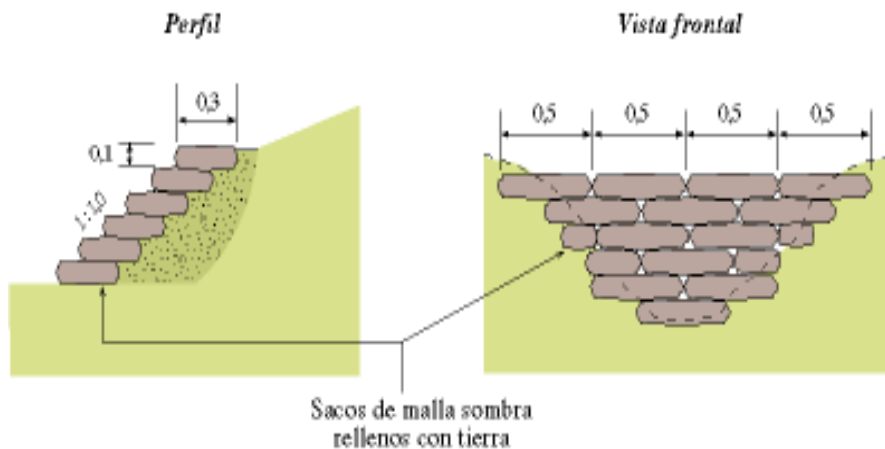
**Tabla 6.13. Materiales para el "Muro de poste de madera".** La tabla indica los materiales necesarios para 10 metros de muro. La estructura esta ideada para estabilizar áreas inestables de taludes, de cauces y de cárcavas, así como también amortiguar el impacto lateral de flujos hídricos de flujos de agua. Fuente: Francke, et al, 2004.

Esta obra debe tener dimensiones básicas entre 0,25 y 0,8 metros y un largo variable. Se utilizan postes o rodrgiones verticales impregnados, que se entierran entre 0,25 a 0,7 metros, se distancian de 0,5 a 0,8 metros y postes u otros materiales para los horizontales que se empotran en el fondo de 0,1 a 0,3 metros. Para aumentar la capacidad de retención de sedimentos la parte posterior de la estructura se cubre con un tipo de "malla sombra" (mínimo 80% de cobertura) u otra de similar calidad. Para proteger la obra en su parte posterior, se debe construir un pequeño terraplén. La distancia entre líneas de empalizadas dependerá del estado de degradación e inclinación del terreno. Empalizadas con una altura entre 0,8 y 1,5 metros deben reforzarse con tirantes de alambre anclados y rellenar según las necesidades de la obra (Fuente: Francke, et al, 2004)

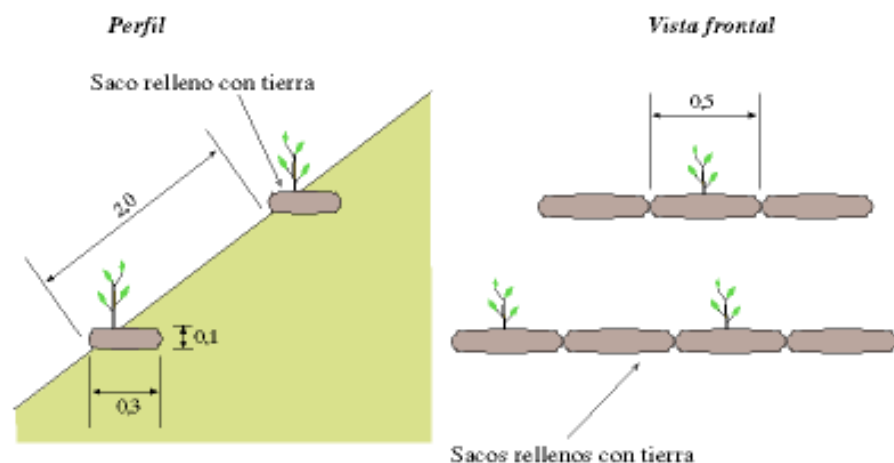
**f) Muro de sacos rellenos**

A través de este tipo de tratamientos se pueden estabilizar áreas inestables de taludes, de cauces y de cárcavas, así como también amortiguar el impacto lateral de flujos hídricos en cursos de agua. Resulta apropiado para aquellos taludes donde no existan intensas presiones del suelo de la ladera. Se ejecuta de manera sencilla a bajos costos. Se requieren materiales como: sacos de malla sombra con coberturas de un 60%, tierra y semillas de pastos (Fuente: Francke, et al, 2004).

Los sacos tienen medidas de 40 × 60 cm. El relleno alcanza una dimensión aproximada de 50 × 30 × 10 cm. Generalmente los sacos se disponen en forma horizontal. Los sacos superiores se van traslapando sobre los inferiores de tal manera de no dejar juntas continuas, susceptibles de erosionarse. Cada corrida superior de sacos se coloca aproximadamente 10 cm. más hacia el interior del talud que su correspondiente corrida inferior. El muro no tiene gran resistencia en sus bordes al paso superficial del agua, por lo que se recomienda que la construcción en estas áreas se realice cuidadosamente. Los pastos deben sembrarse inmediatamente después de finalizar la colocación de cada corrida de sacos de tal forma de adelantarse al proceso de endurecimiento del suelo, provocado por procesos de compactación, cambios de humedad y de temperatura (Fuente: Francke, et al, 2004).



**Fig. 6.39. Vista perfil y frontal muro de sacos como estabilizador de flujos hídricos.** El muro no tiene gran resistencia en sus bordes al paso superficial del agua, por lo que se recomienda que la construcción en estas áreas se realice cuidadosamente. Fuente: Francke, et al, 2004.



**Fig. 6.40. Vista perfil y frontal muro de sacos como amortiguador de impactos laterales.** En su ejecución debe emparejarse el talud y la base, rellenar con tierra y empotrar los sacos en el fondo, disponerlos imbricados y escalonados (Francke, et al, 2004).

La ejecución de la obra se realiza según los siguientes pasos:

- Emparejar el talud
- Rellenar canalículos
- Excavar la base
- Colocar la primera corrida de sacos (o línea base)
- Sembrar semillas de pastos en la superficie de los sacos rellenos
- Rellenar los espacios entre la corrida de sacos y el talud
- Compactar moderadamente
- Colocar la segunda corrida y realizar el mismo procedimiento descrito con anterioridad, hasta finalizar la obra
- Plantar árboles en la parte posterior del muro.

Para esta obra se utilizan sacos de polietileno "tipo malla sombra" de 50 a 65% de cobertura, de 0,6 m de largo x 0,4 m de ancho. En su ejecución debe emparejarse el talud y la base, rellenar con tierra y empotrar los sacos en el fondo, disponerlos imbricados (como ladrillos en albañilería) y escalonados con peldaños de 6 a 10 cm. (Fuente: Francke, et al, 2004).

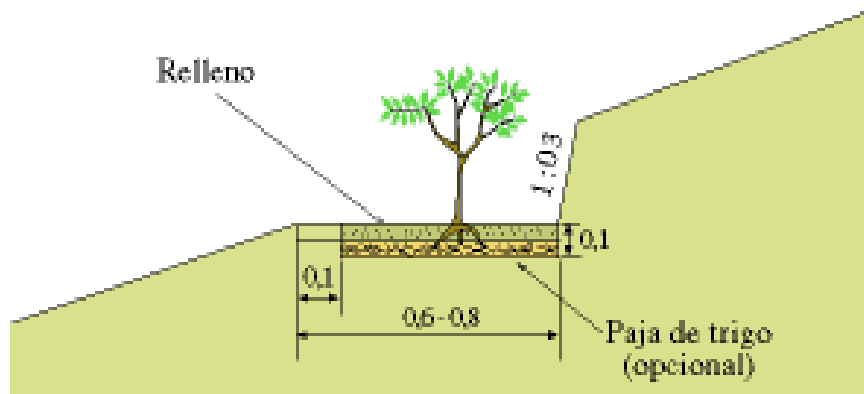
<b>Materiales</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Especificaciones</b>
Sacos de malla sombra	20	U	Tamaño: 0,6 mt x 0,4 mt; 60 % de cobertura
Tierra	2,60	mt <sup>3</sup>	0,13 mt <sup>3</sup> / saco

**Tabla 6.14. Materiales para el muro de sacos rellenos.** Los elementos indicados en la tabla están estipulados para 1 mt<sup>2</sup> de construcción. Este tratamiento resulta apropiado para aquellos taludes donde no existan intensas precipitaciones del suelo de la ladera. Fuente: Francke, et al, 2004.

Cuando corresponda se debe construir un pequeño terraplén o rellenar en su parte posterior. El largo de esta obra es variable y la altura no debe superar 1,2 m cuando se trabaje en las cabeceras de cárcavas. Como complemento de la obra se deben sembrar las especies herbáceas apropiadas para cada región (Fuente: Francke, et al, 2004).

#### g) Terraza forestal

Este tratamiento resulta apropiado en laderas de pendientes moderadas con erosión del tipo laminar y lineal incipiente. De sencilla ejecución y bajo costo, la longitud de la terraza se adecua al terreno. Las terrazas se trazan a nivel, se deja un 1% de pendiente hacia el interior del talud. Sus dimensiones fluctúan de 0,5 a 1 m de ancho y de largo variable. En tanto la altura del talud puede variar de 0,2 a 0,25 m. La pendiente lateral puede ser de una relación 1: 0,3 o 1: 0,5. La construcción del camellón implica una altura que varía entre 0,15 y 0,2 m, el distanciamiento entre terrazas se determina en función de la pendiente, degradación suelo y distancia de la línea de plantación la cual se realiza sobre la base para suelos profundos o sobre el camellón en caso de suelos delgados (Fuente: Francke, et al, 2004)



**Fig. 6.41. Vista lateral de una terraza manual.** Presenta un ancho en la base de 0,5 a 1,0 m, una altura de talud entre 0,2 a 0,25 m con una pendiente de 1: 0,3 a 1: 0,5. Se establece en curvas de nivel con una base levemente inclinada hacia el borde interno. Fuente: Francke, et al, 2004.

Los pasos para la ejecución de esta obra son los siguientes:

- Trazar las terrazas a nivel
- Excavar la terraza con una leve inclinación hacia el interior del talud
- Preparar la superficie de la terraza para plantación y/o siembra
- Adicionar materia orgánica para enriquecer el suelo (opcional)
- Plantar árboles y/o sembrar pastos

Obra de regulación de flujos hídricos en laderas. Favorece una mayor infiltración en el suelo y retiene sedimentos. Presenta un ancho en la base de 0,5 a 1,0 m, una altura de talud entre 0,2 a 0,25 m con una pendiente de 1: 0,3 a 1: 0,5. Se establece en curvas de nivel con una base levemente inclinada (1% aproximado) hacia el borde interno. Aguas abajo de la obra debe construirse un camellón de una altura de 0,15 a 0,2 metros. La distancia entre líneas de terrazas dependerá de la inclinación del terreno, de la degradación del suelo y de la distancia de las líneas de plantación (Fuente: Francke, et al, 2004).

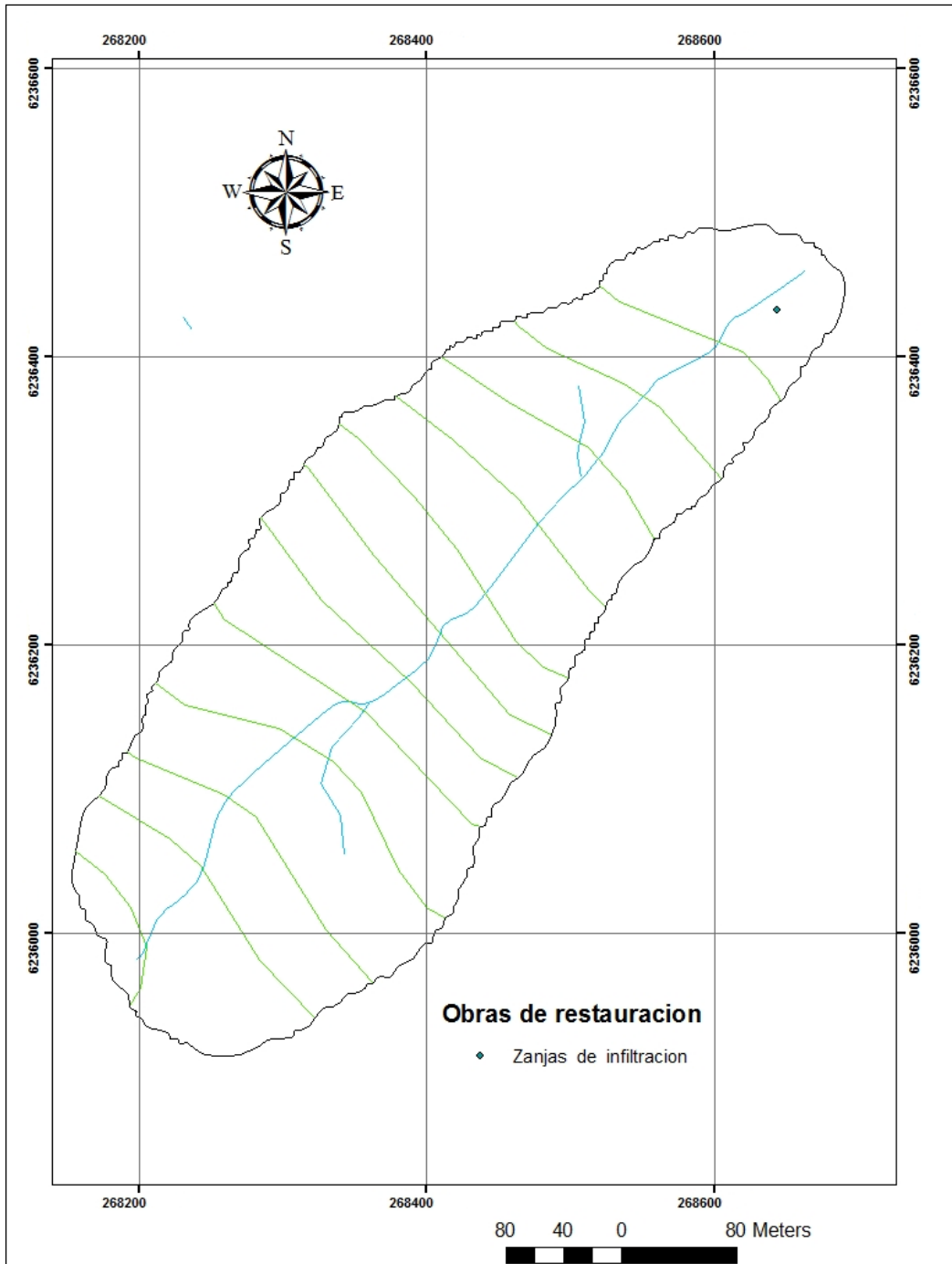
El largo de las terrazas es variable, con una disposición continua o discontinua. La plantación se debe establecer sobre la base del tratamiento, cuando el suelo sea profundo, o sobre el camellón cuando el suelo sea delgado o superficial.

<b>Materiales</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Especificaciones</b>
Rastrojos de trigo	1 a 2	mt <sup>3</sup>	Uso opcional

**Tabla 6.15. Requerimientos para la construcción de una terraza forestal.** Los elementos están considerados para 1 mt de terraza. Este tratamiento resulta apropiado en laderas de pendientes moderadas con erosión de tipo laminar y lineal incipiente. De sencilla ejecución y bajo costo. La longitud de la terraza se adecua al terreno. Fuente: Fracke, et al. 2004.

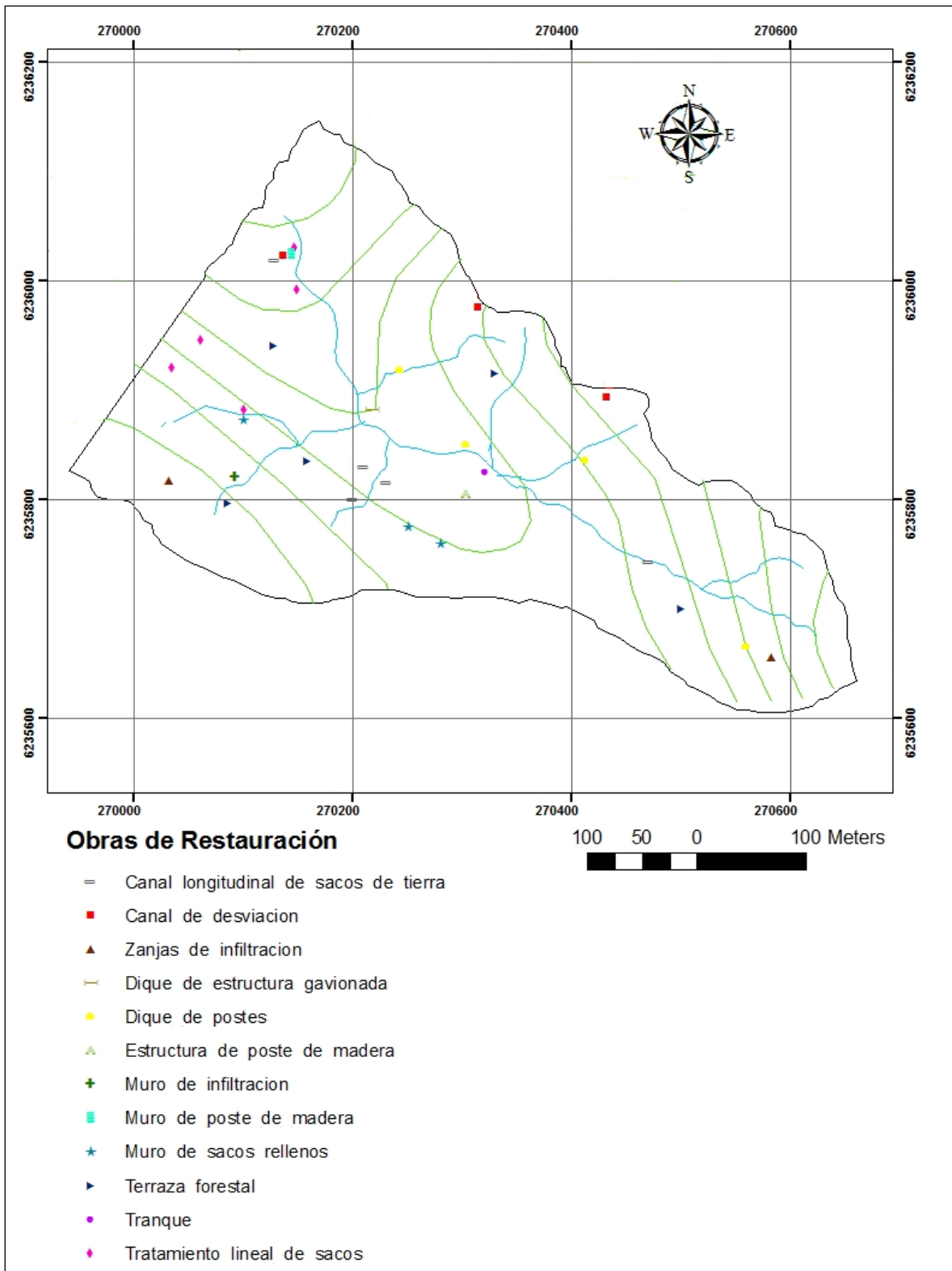
#### **h) Biotecnias**

Consiste en un tratamiento biológico con especies herbáceas y leñosas arbustivas recuperadoras y estabilizadoras de suelos degradados cumpliendo un rol complementario a los trabajos físico mecánicos de obras de recuperación de suelos. Complementa trabajos físico-mecánicos (en zonas como camellones y terraplenes y sacos), estabiliza áreas tales como: taludes, cárcavas, márgenes de cauces secundarios y suelos que lo requieran tales como camellones, terraplenes, sacos y rellenos.. Para superficies estabilizadas se debe establecer más de un 60% de cobertura vegetal homogéneamente distribuida (Fuente: Francke, et al, 2004).

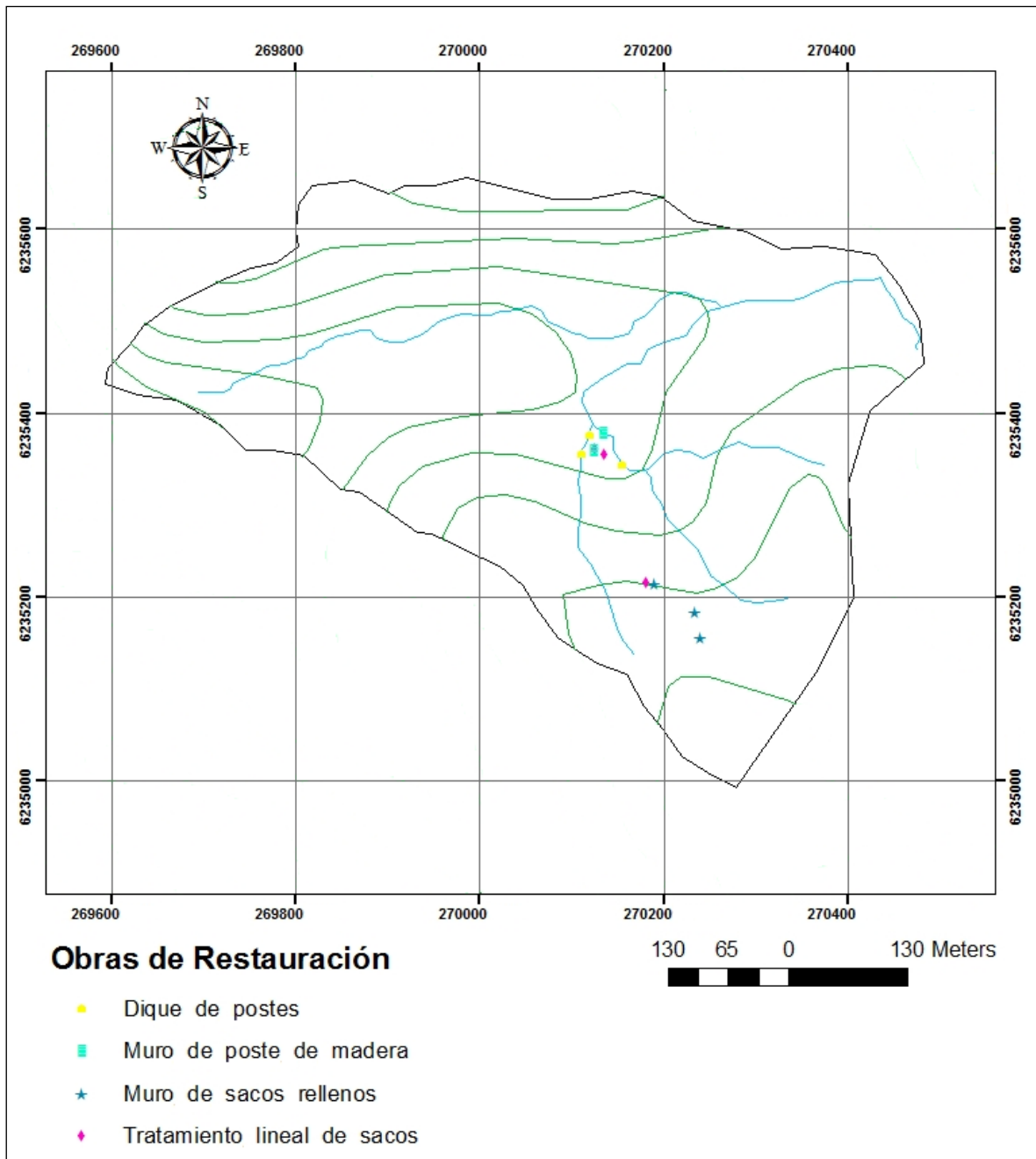


**Figura 6.42. Layout físico de las obras de restauración hidrológico – forestal de la microcuenca 1.** La figura indica la presencia de zanjas de infiltración en el sector norte de la microcuenca. En aquel sector se instaló un sistema de zanjas en la ladera acompañada de obras de reforestación con pinos y eucaliptus, de tal forma que la captura de agua producida durante las precipitaciones permitiera el abastecimiento de agua para las especies vegetales permitiendo la reforestación de la zona. Fuente: Elaboración propia.





**Figura 6.43. Layout físico de las obras de restauración hidrológico – forestal de la microcuenca 2.** La figura muestra la gran variedad de obras de restauración implementadas en esta microcuenca, abarcando una gran extensión de la misma; lo cual ha permitido el crecimiento de masa arbórea los últimos años. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 6.44. Layout físico de las obras de restauración hidrológico – forestal de la microcuenca 3.** La incorporación de obras de restauración no ha sido tan variada como en la microcuenca 2, ya que, estas se incorporan dependiendo de las condiciones topográficas y el objetivo puntual que se persigue con la implementación de las obras. Aunque solo se ha restringido a solo 4 obras diferentes, a diferencia de la anterior, se implementaron pocas obras pero en gran cantidad principalmente sacos de tierra y dique de postes de madera. Fuente: Elaboración propia.

---

# CAPÍTULO VII

## RESULTADOS

---



La estructura conceptual y metodológica del trabajo se centra en la presentación de un modelo de restauración para cuencas hidrográficas, basado en obras de restauración hidrológico – forestales las cuales, fueron probadas en la década de los años 90 como parte de un proyecto CONAF – JICA en el sector de Alto loica en la zona central de Chile. Sin embargo, el proyecto careció de un análisis histórico al no estar disponibles en esos años las herramientas digitales que permitieran el levantamiento de la información para efectuar un seguimiento que permitiera cuantificar el grado de avance de los procesos de restauración.

Como se mencionara en capítulos anteriores, el fin del proyecto fue la reforestación y la disminución de la superficie erosionada, pero no se profundizó en los aspectos microbianos del suelo ni tampoco en la cuantificación del carbono atmosférico fijado en las microcuencas producto de la reforestación y el aumento de la biomasa arbórea.

El modelo presentado consiste en la aplicación de la “ingeniería de requerimientos” como herramienta metodológica para la cuantificación del carbono atmosférico fijado en la biomasa así como todos los pasos previos para su desarrollo.

La evaluación final del modelo consiste en los resultados aquí expuestos; en primer lugar se analiza la situación final de las microcuencas mediante el análisis de la evolución arbustiva a través del NDVI para medir el desarrollo de la vegetación<sup>94</sup>. Para ello se considera el inicio del proyecto<sup>95</sup> solo hasta el año 2010; esto porque el incendio del año 2012 arrasó las microcuencas por lo que el desarrollo posterior no sería consecuente con el análisis y desarrollo histórico. En segundo lugar, se presenta un análisis del suelo de las microcuencas en los aspectos físico, químico, microbiológico e hidrológico; cuyos resultados resultan claves para conocer las condiciones de futuras restauraciones. En tercer lugar, se formulan un modelos integro–diferenciales sobre el funcionamiento de las obras de restauración (específicamente zanjas de infiltración), las cuales, pueden ser aplicables a futuros escenarios cuando estas obras sean implementadas para llevar a delante planes de restauración forestal en suelos erosionados. Finalmente y en cuanto lugar se elabora un modelo basado en redes neuronales artificiales, las cuales, mediante variables cuantificadas y previamente definidas se establece este mecanismo para ser aplicado en futuros escenarios en la zona semiárida de Chile con las condiciones y estudios ya descritos. Los cuatro puntos mencionados (y presentados en este capítulo) son la síntesis y el resultado de la generación del modelo global.

---

<sup>94</sup> Esto solo como primer punto, ya que el análisis de la situación inicial incluye el análisis morfométrico de las cuatro microcuencas más la aplicación de un modelo heurístico diseñado para esta investigación.

<sup>95</sup> Se considera el análisis desde el año 1990, expuesto en el capítulo 6. El desarrollo posterior desde el año 1995 en adelante se expone en este capítulo.

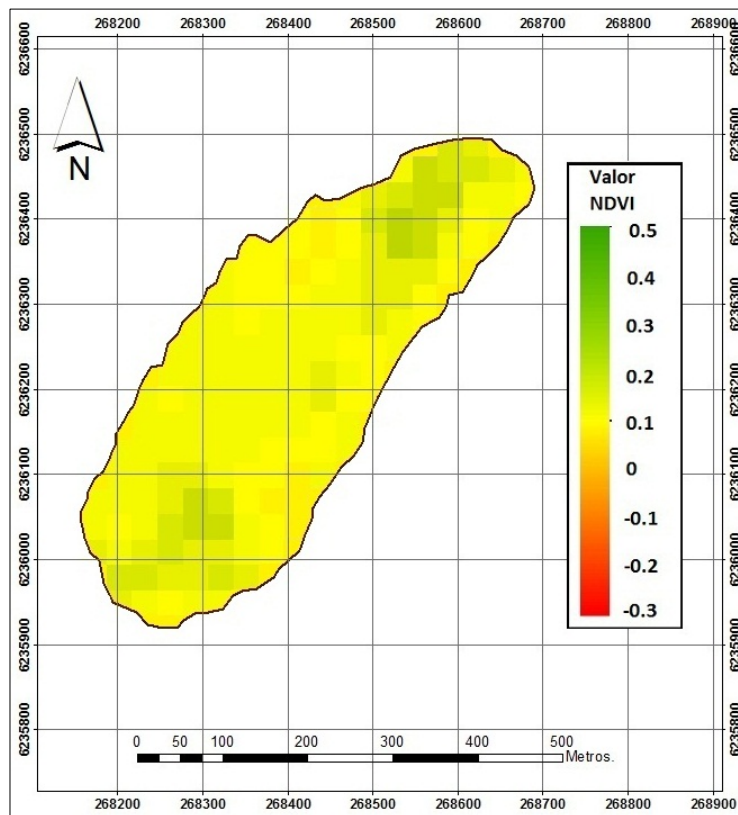
## 7.1. DESCRIPCIÓN DE LA SITUACIÓN ACTUAL DE LAS MICROCUENCAS

### 7.1.1. Descripción de las microcuencas en la etapa posintervención

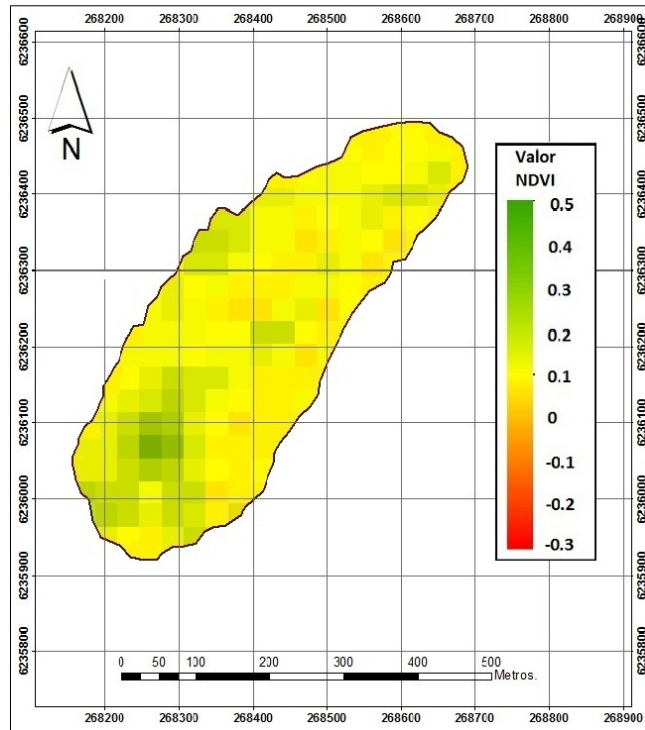
#### 7.1.1.1. Microcuenca 1

En la microcuenca 1, los trabajos de restauración e instalación de las obras hidrológico – forestales se llevaron a cabo en la zona norte de la microcuenca por lo que en esa zona la biomasa (compuesta básicamente por eucaliptus y peumos) muestra un mayor crecimiento. De la misma forma, la vegetación ha crecido básicamente en el curso del cauce principal debido a la disponibilidad de agua principalmente en la temporada invernal.

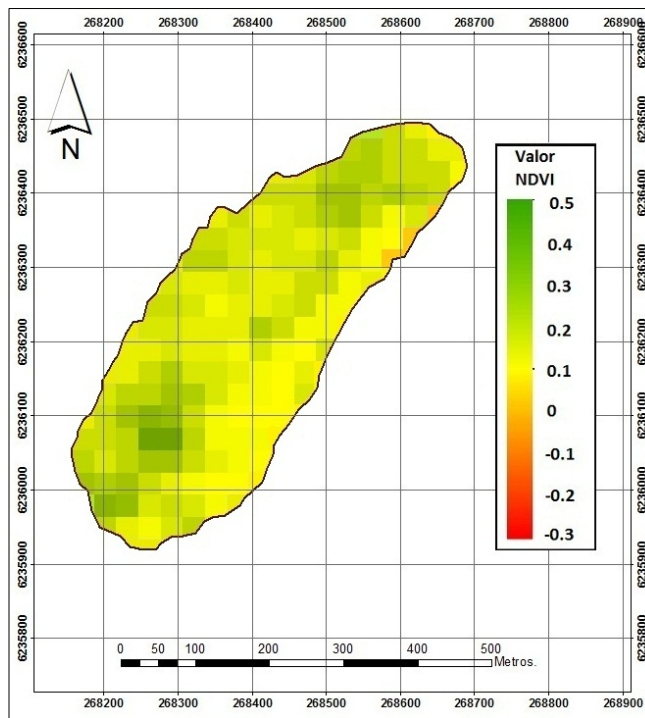
En los primeros años no hay un crecimiento significativo, debido principalmente a las constantes sequías que azotan la zona central desde la década de los años 80, lo que de alguna manera disminuye la condición del estrato arbóreo disminuyendo el valor del NDVI. Aunque, en el año 2010 hay una diferencia significativa en la biomasa desde la implementación del proyecto. Infiuye además el cerco efectuado a la microcuenca lo que ha impedido en ingreso de animales herbívoros que pudiesen afectar las especies vegetales existentes en la microcuenca.



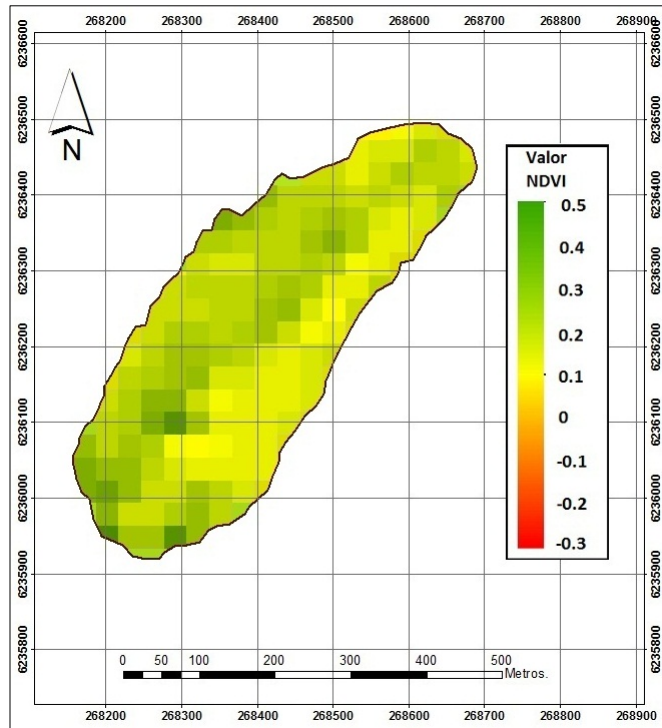
**Figura 7.1. NDVI de la microcuenca 1, año 1995.** En el año 1995 ya se habían instalado obras en la zona norte de la microcuenca, por ello, la figura indica una leve diferencia en dicho sector. Fuente: Elaboración propia.



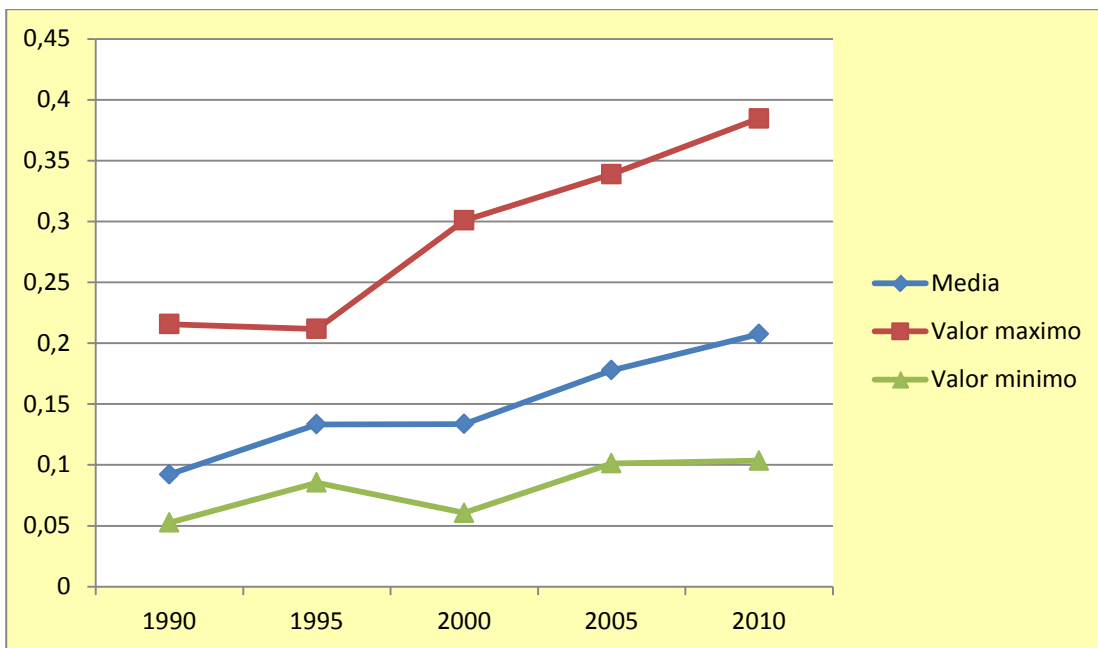
**Figura 7.2. NDVI de la microcuenca 1, año 2000.** El NDVI de la microcuenca no cambio sustancialmente en comparación al año 1995, tal como lo indica la figura. Se observa un cambio en la zona sur de la microcuenca en comparación al año 1990. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 7.3. NDVI de la microcuenca 1, año 2005.** Se denota un diferencia sustancial en comparación a los años anteriores. Nuevamente se observa una zona forestada en el sector norte. Fuente. Elaboración propia.



**Figura 7.4. NDVI de la microcuenca 1, año 2010.** La microcuenca presenta un cambio significativo en comparación con años anteriores. La aparición de vegetación se observa principalmente en el cauce principal; aunque en la zona norte esta se debe básicamente a la instalación de obras, el cierre del perímetro para el ingreso de animales en la década del 90, tiene una importancia vital para la conservación de la vegetación. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 7.5. Cuantificación del factor NDVI para la microcuenca 1.** Aunque en los primeros años la aparición de la vegetación es mínima, la gráfica muestra un aumento sostenido del NDVI lo que indica un incremento de biomasa vegetal en la microcuenca. Fuente: Elaboración propia.





**Figura 7.6. Estado de la microcuenca 1 año 2010.** La imagen muestra la zona reforestada de la microcuenca 1, se observan eucaliptus de fondo y una plantación de peumos más cercana. La imagen muestra las zanjas de infiltración a la cual la vegetación ha respondido favorablemente. Fuente: Captación propia.



**Figura 7.7. Pino piñonero (*Pinus pinea*).** El pino fue una de las de las especies utilizadas en el proceso de reforestación junto con los eucaliptus y peumos (más recientemente). Esta especie ha respondido favorablemente a las condiciones del suelo y características climáticas de las microcuencas. Fuente: Captación propia.



**Figura 7.8. Ciprés de Arizona (*Cupressus arizonica*).** Localizado en la zona media de la microcuenca, esta especie ha respondido favorablemente a la restauración al igual que las otras especies de coníferas. Si bien, las coníferas restringen el crecimiento del sotobosque y otras especies herbáceas, han resultado ser una excelente especie para disminuir la pérdida de suelo. Fuente: Captación propia.

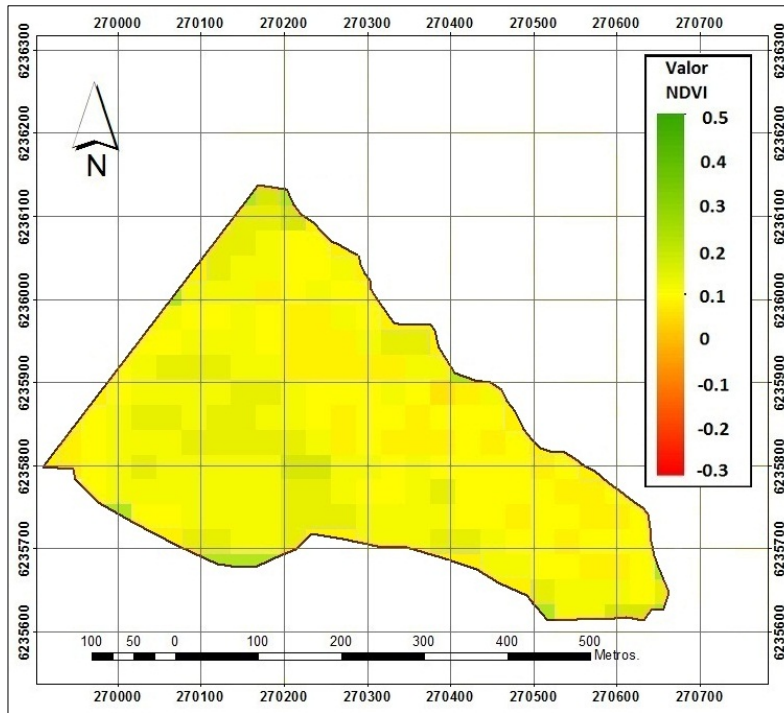
#### **7.1.1.2. Microcuenca 2**

La microcuenca 2 se caracteriza por ser el sector donde se implementó una mayor diversidad (y cantidad) de obras de restauración (terrazas y hasta un embalse entre otros) por lo que es posible encontrar una obra hidrológica–forestal en casi toda la microcuenca y en todas las laderas. Muchas de estas obras cumplieron su función y han sido casi absorbidas por el entorno, por ejemplo, muchos diques en la ladera de exposición Oeste están cubiertos por vegetación en donde antes no existía.

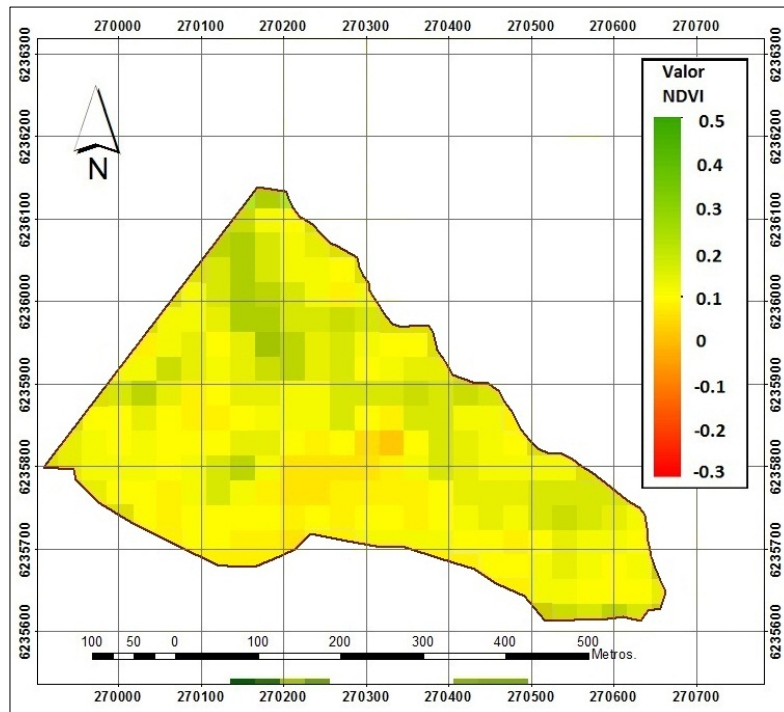
En esta microcuenca el valor del NDVI alcanza una mayor diferencia entre el año 1990 (antes del inicio del proyecto) y el año 2010 (última medición), lo que indica que esta microcuenca fue la que mejor respondió a los procesos de restauración alcanzando un alto nivel de biomasa arbustiva y arbórea.

Además, esta microcuenca presentó un aumento sostenido del NDVI lo que implica que resistió mejor los procesos de sequía ocurridos en la zona central. Sin embargo, este índice presenta una disminución entre los años 200 y 2005, lo que se asume producto de la disminución de eventos pluviométricos lo que disminuyó la robustez de la vegetación lo que de alguna manera influyó en la medición del NDVI, pero no implicó una disminución sustantiva de la vegetación, ya que, no se registraron talas significativas ni incendios en la microcuenca. Además, esta microcuenca fue cercada lo que impidió el ingreso de animales herbívoros que dañaran la vegetación.

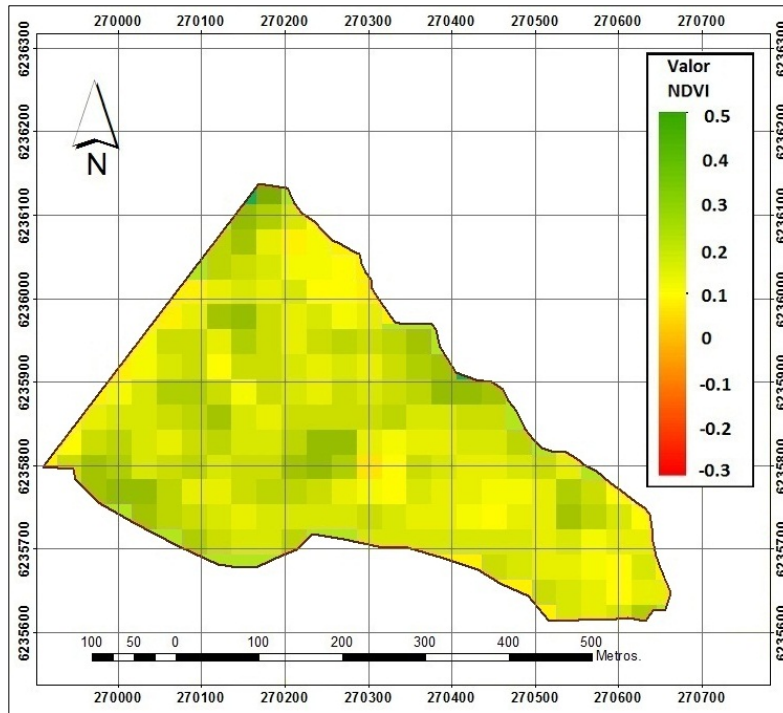




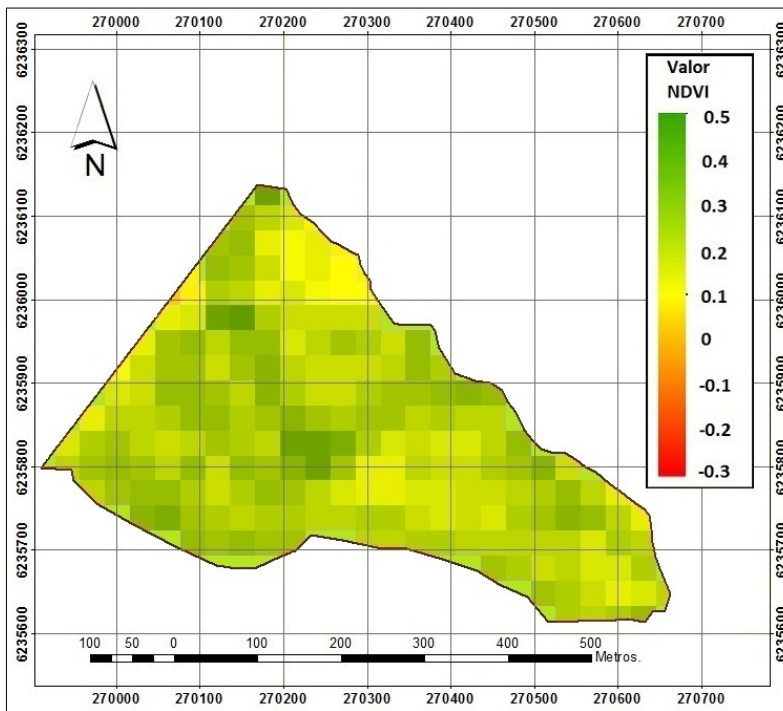
**Figura 7.9. NDVI de la microcuenca 2, año 1995.** La microcuenca muestra una diferencia significativa en comparación con el año 1990 debido a un aumento en el valor del NDVI producto de la implementación de las obras y la reforestación. Fuente: Elaboración propia.



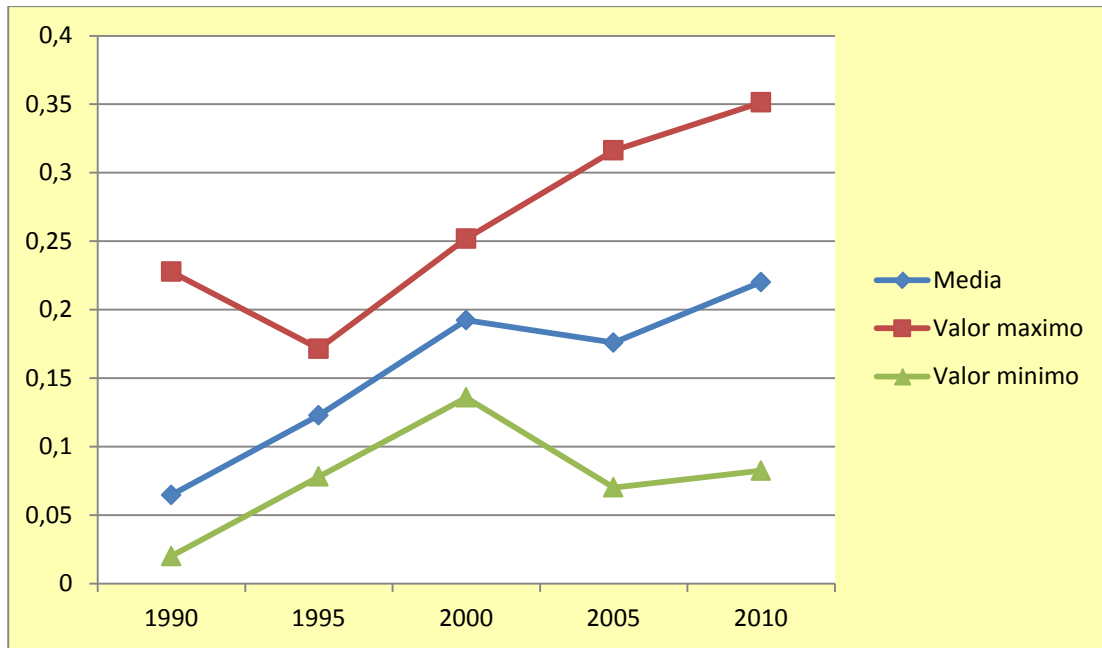
**Figura 7.10. NDVI de la microcuenca 2, año 2000.** En esta microcuenca se implementó una mayor diversidad de obras de restauración, producto de ello, es un cambio vegetacional que se manifiesta en un aumento de la biomasa arbórea. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 7.11. NDVI de la microcuenca 2, año 2005.** La figura indica un aumento considerable de la biomasa vegetal en comparación al estado de la microcuenca al inicio del proyecto. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 7.12. NDVI de la microcuenca 2, año 2010.** La vegetación cubre la microcuenca en toda su extensión. Esto, producto de la reforestación en combinación con las obras implementadas, ya que, aquí hay una mayor diversidad de obras de restauración. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 7.13. Cuantificación del factor NDVI para la microcuenca 2.** La grafica indica un aumento sostenido del NDVI desde el inicio del proyecto hasta el año 2000, con un descenso el año 2005y posteriormente hay un alza en el valor en el año 2010 que supera el valor del año 2000. Las diferencias pluviométricas entre un año y otro influyen en la robustez de la vegetación, lo que a su vez influye en el NDVI. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 7.14. Estado de la microcuenca 2 año 2010.** Imagen captada desde la zona SE de la microcuenca, se observa el embalse de fondo y especies como eucaliptus, aromo australiano y romerillo. Esta microcuenca fue que la mejor respondió a los procesos de restauración; debido a que las especies arbóreas y herbáceas disminuyen notablemente la erosión. Fuente: Captación propia.





**Figura 7.15. Espino (*Acacia cavens*).** Localizado en la zona baja de la microcuenca, esta es una de las especies más representativas de la zona semiárida de Chile, se caracteriza por su alta tolerancia a la sequedad y crecimiento en zonas con estaciones marcadas. Aunque en forma natural se encontraba restringida solo hasta la cuenca del Aconcagua, actualmente es posible encontrarla hasta la cuenca del Cachapoal en la zona centro - sur de Chile. Esta especie también ha sido clave en los procesos de restauración. Fuente: Captación propia.



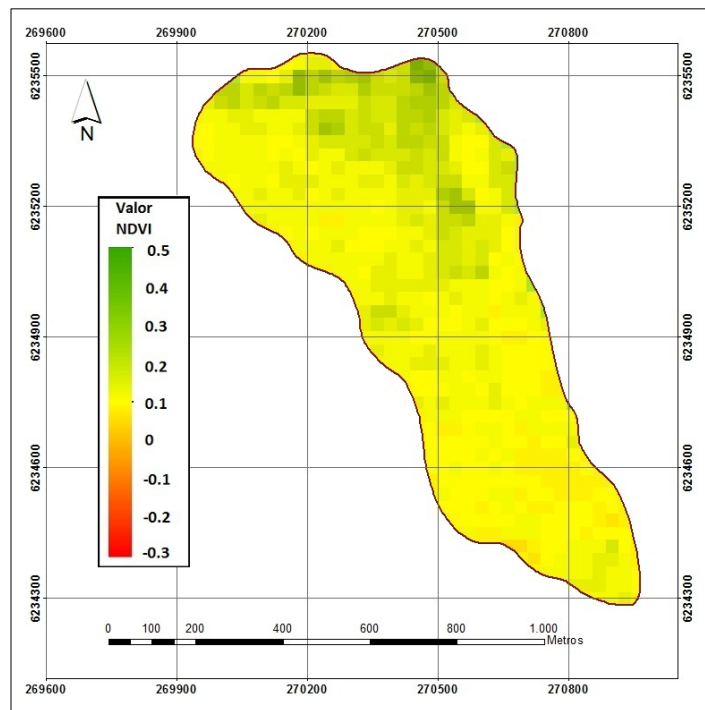
**Figura 7.16. Eucalipto común (*Eucalyptus cameldulensis*).** Árbol exótico utilizado para procesos de reforestación en las microcuencas 1, 2 y 3, es posible encontrarlo en sector sur de la microcuenca. En las zonas altas no fue asociado a zanjas de infiltración, por lo cual, presenta una notable disminución en tamaño en comparación a los individuos de la microcuenca 1 que están asociados a zanjas. Fuente. Captación propia.

### 7.1.1.3. Microcuenca 3

En esta microcuenca, las obras se instalaron solo en la zona norte, lo cual, se observa por la concentración de la biomasa arbórea en dicho sector. Las obras de restauración instaladas no tienen la diversidad presente en la microcuenca 2 por lo que la biomasa existente en la microcuenca 3 no alcanza los valores del NDVI de la microcuenca 2, ya que, la pendiente (de los valores NDVI) es menos pronunciada y con una pendiente más leve en comparación con los valores de la microcuenca 2, aunque, se observa un aumento de biomasa vegetal en comparación a los años 90.

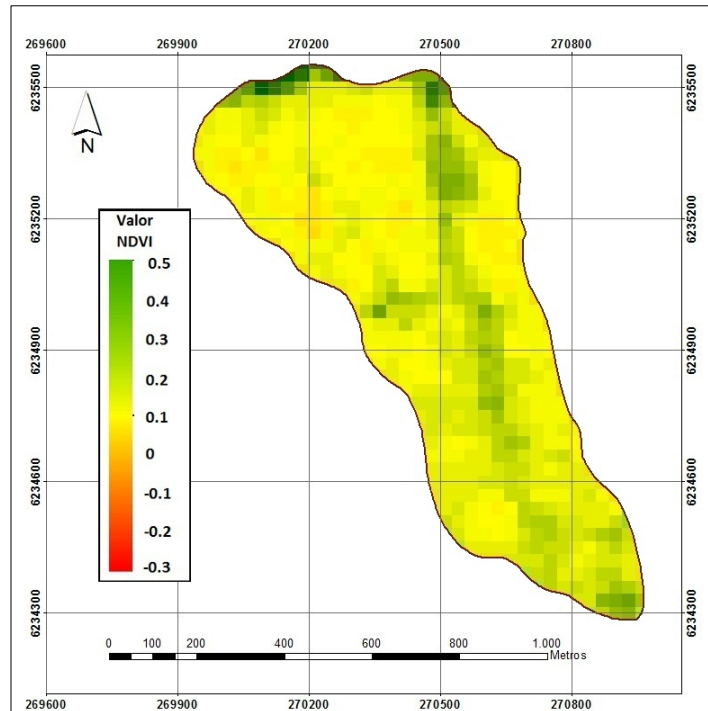
Este sector es el único que (a diferencia de las microcuencas anteriores) se encuentra habitado por lo que hay una componente antrópica que se restringe solo a la zona norte, lo que a través de los años no ha alterado en forma significativa los procesos de reforestación y restauración del lugar.

La microcuenca 3, fue la más afectada producto del incendio que azotó la zona de Alto Loica el año 2012, ya que, la vegetación existente fue completamente arrasada<sup>96</sup>; la biomasa existente el día de hoy es producto de los brotes de árboles exóticos (pinos y eucaliptus) que tuvieron el potencial de después del paso de las llamas. Por ello, no puede hacerse un análisis comparativo entre la vegetación existente el día de hoy con la vegetación de años anteriores.

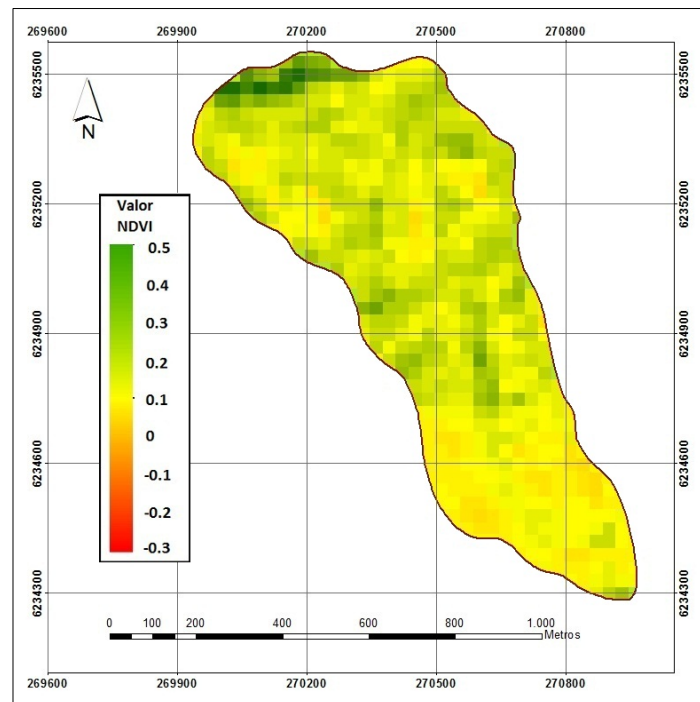


**Figura 7.17. NDVI de la microcuenca 3, año 1995.** Las obras de restauración así como la reforestación se efectuaron en la zona norte de la microcuenca (por dicho lugar está el acceso al lugar), lo que puede observarse en la figura. Fuente. Elaboración propia.

<sup>96</sup> Las obras de restauración hidrológica – forestales (como empalizadas y diques) también se redujeron a cenizas producto de las llamas.

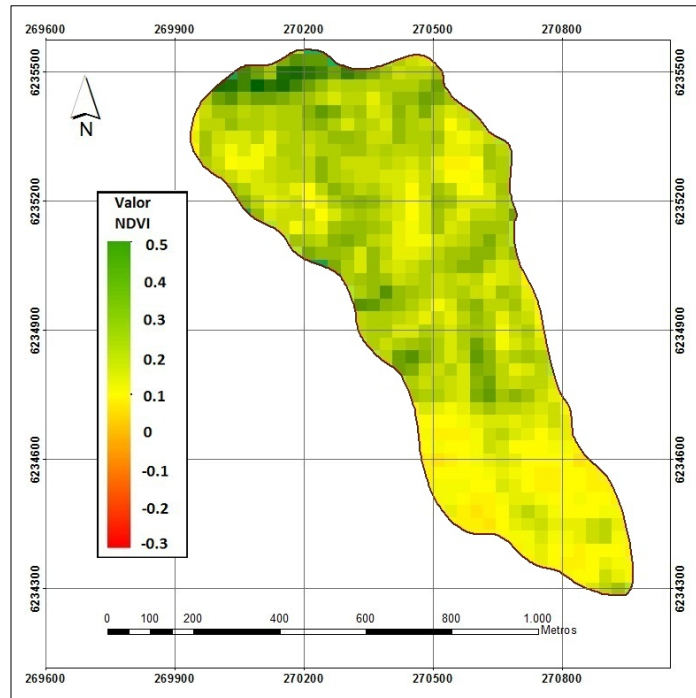


**Figura 7.18. NDVI de la microcuenca 3, año 2000.** En el año 2000, puede observarse una diferencia significativa en cuanto a la biomasa vegetal, la cual, se concentra en los márgenes del cauce principal debido a la disponibilidad de agua. Fuente: Elaboración propia.

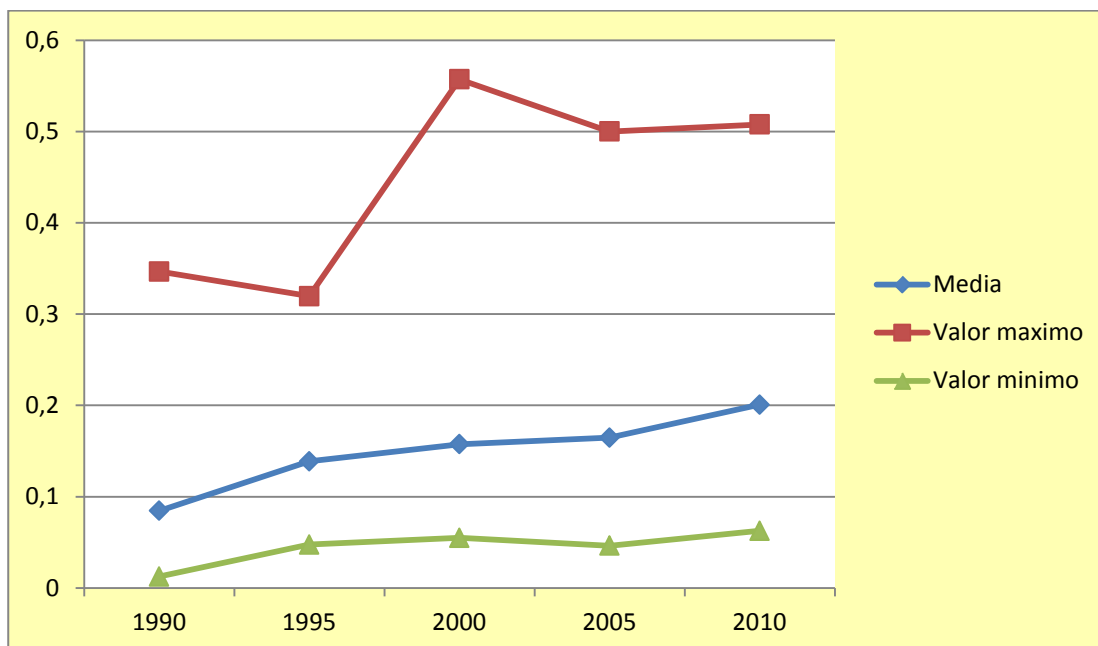


**Figura 7.19. NDVI de la microcuenca 3, año 2005.** La diferencia del NDVI en comparación al año 2000 es muy leve (sigue la tendencia de los años anteriores donde incluso en algunos casos es menor), aunque puede observarse un aumento de la biomasa en toda la microcuenca. Fuente: Elaboración propia.





**Figura 7.20. NDVI de la microcuenca 3, año 2010.** Claramente la biomasa es mayor en comparación a los años anteriores; en valor del NDVI es el más alto desde el año 1990, lo que indica un crecimiento sustantivo de la vegetación. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 7.21. Cuantificación del factor NDVI para la microcuenca 3.** La pendiente del valor del NDVI es menos pronunciada en comparación con la microcuenca 2, aunque, presenta un aumento sostenido de este valor pero alcanza valores más bajos. Aquí se instalaron menos obras concentrándose solo en la zona norte de la microcuenca. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 7.22. Estado de la microcuenca 3 año 2010.** Aunque no hubo una formación de sotobosque (mínima o inexistente en algunos sectores) o cubierta herbácea que contribuyera a mitigar el impacto de la gota de lluvia, esta microcuenca también respondió positivamente a los procesos de restauración. En la imagen se observa una plantación de fondo y una formación de sacos para evitar la pérdida de suelo, los cuales se implementaron en gran parte de la microcuenca. Fuente: Captación propia.



**Figura 7.23. Boldo (*Peumus boldus*).** La imagen muestra un individuo arbóreo de la microcuenca 3 que forma parte del antiguo bosque nativo esclerófilo que existía en el lugar. El boldo es un árbol autóctono que puede alcanzar dimensiones sobre los 15 metros, de hoja dura, crecimiento lento y gran resistencia a la aridez. Fuente: Captación propia.

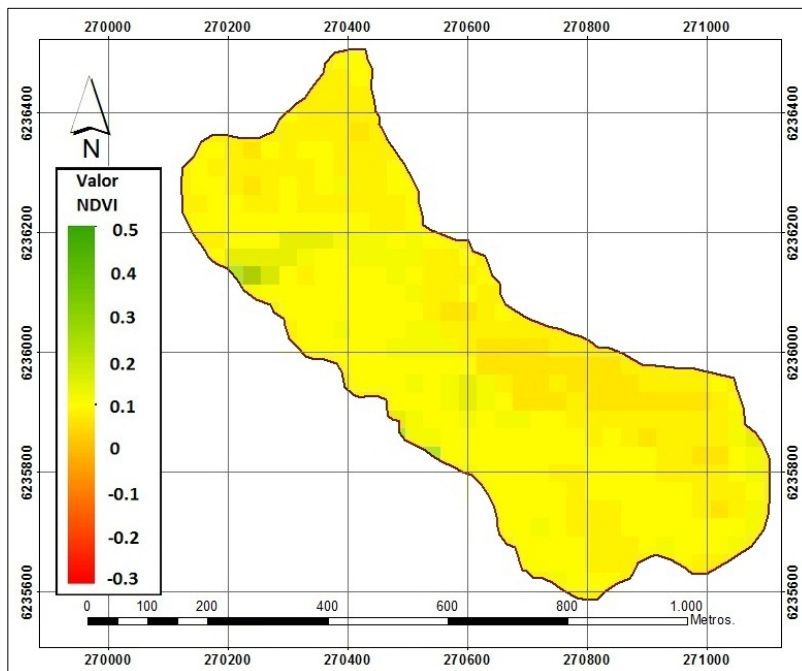
#### 7.1.1.4. Microcuenca 4

La microcuenca 4 es la denominada microcuenca testigo por no existir en ella ninguna obra de restauración hidrológica forestal debido a que fue utilizada por el proyecto CONAF – JICA como patrón comparativo para los procesos de restauración llevados a cabo en las microcuenca anteriores (1, 2 y 3).

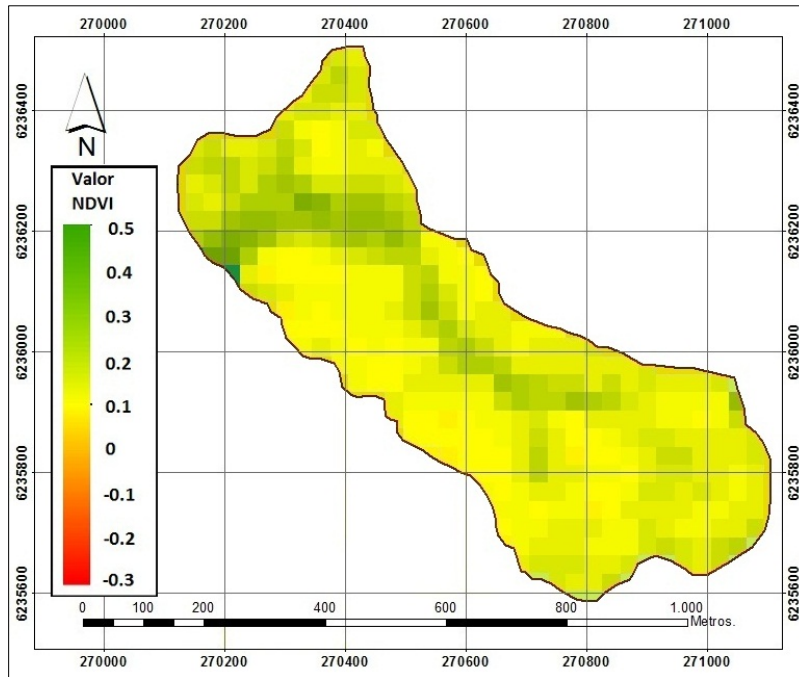
Los valores del NDVI son menores en esta microcuenca comparados con los valores presentados en las microcuencas anteriores, incluso, los valores descienden a partir el año 2000 manteniendo una disminución por 10 años (hasta el año de la última medición) lo que indica que no existen procesos de crecimiento de biomasa y por ende no hay indicios que permitan inferir una disminución de la superficie erosionada.

La vegetación (consistente solo en herbáceas y algunos arbustos) se restringe solo al cauce principal lo que indica que el aumento de la vegetación es producto de los eventos pluviométricos de la temporada invernal.

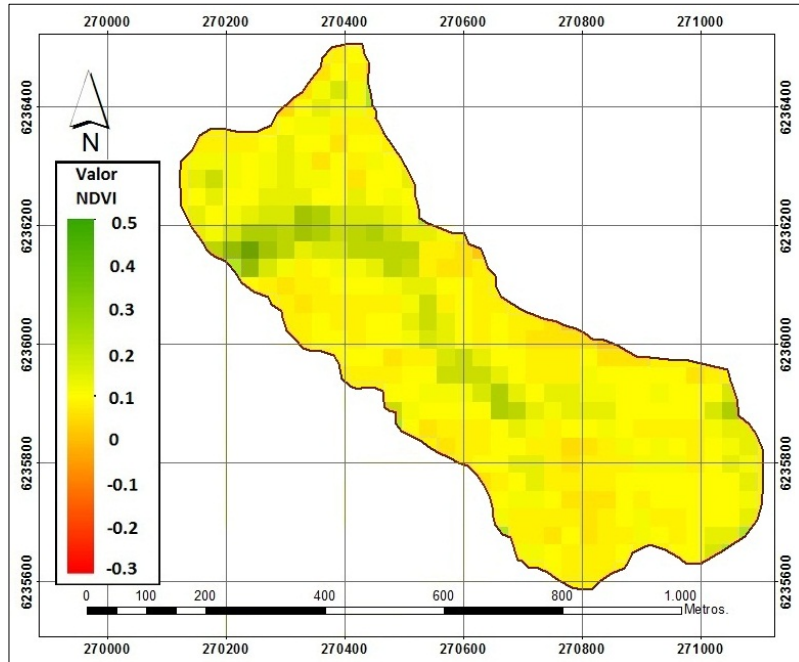
Lo anterior es indicativo además que la microcuenca es incapaz por si sola de resistir los procesos erosivos, ello se manifiesta en una disminución del valor del NDVI desde el año 2000, lo cual, es producto de la inexistencia de planes de reforestación y la ausencia de obras que permitan el crecimiento de biomasa arbórea.



**Figura 7.24. NDVI de la microcuenca 4, año 1995.** En esta microcuenca no se instalaron obras de restauración por lo que existe un leve diferencia en comparación al año 1990. Fuente. Elaboración propia.

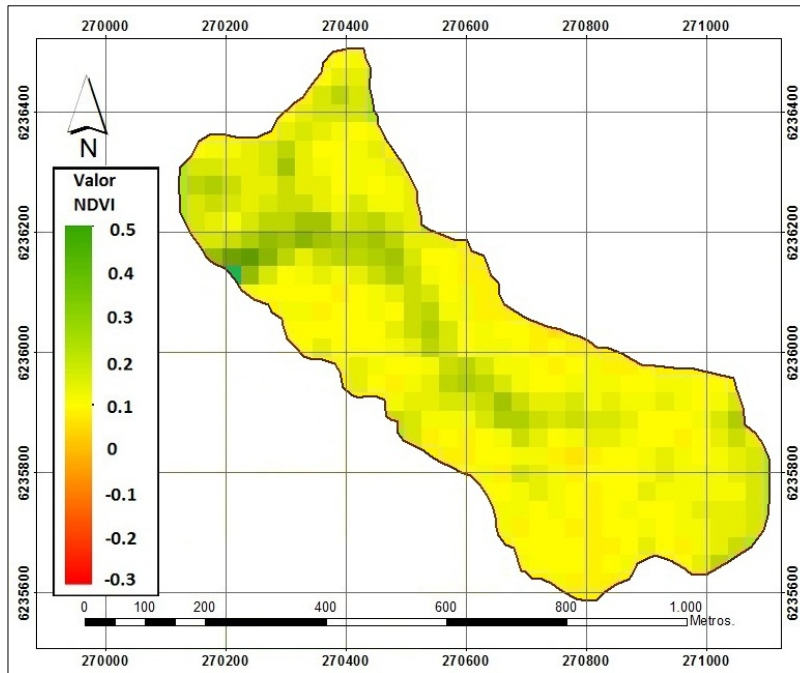


**Figura 7.25. NDVI de la microcuenca 4, año 2000.** A pesar de existir una diferencia en el valor del NDVI entre los años 1995 y 2000; en este último es levemente mayor debido a la presencia de vegetación existente solo en el curso del cauce principal producto de la disponibilidad de agua y no debido a la existencia de obras de restauración. Fuente: Elaboración propia.

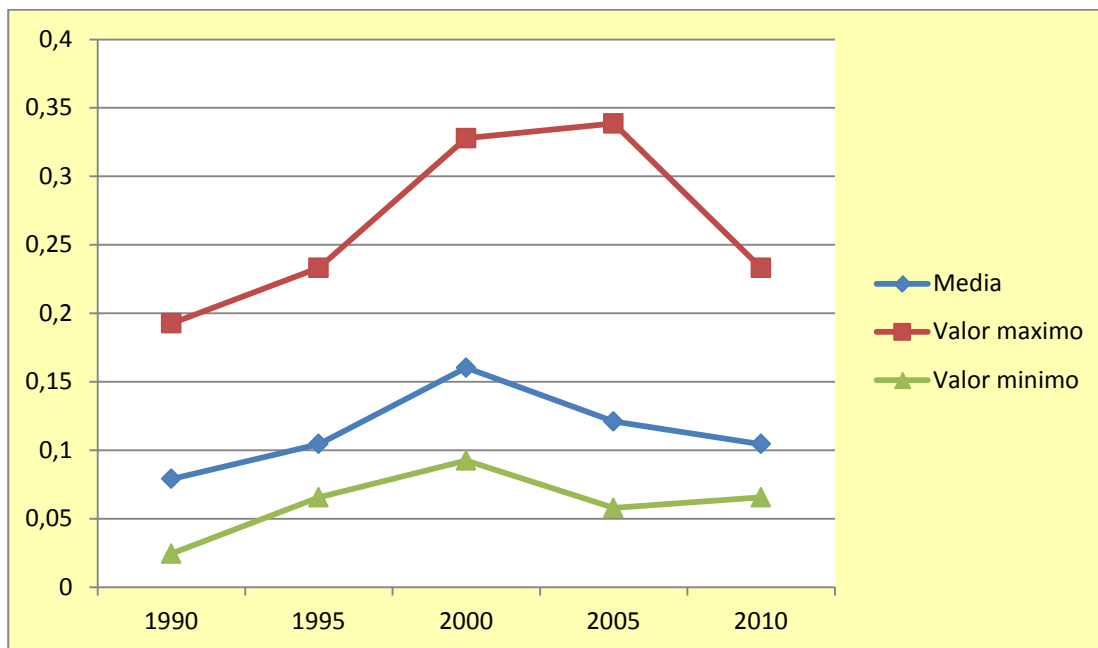


**Figura 7.26. NDVI de la microcuenca 4, año 2005.** La microcuenca sigue la tendencia de los casos anteriores en que se registra una disminución (o un aumento menos pronunciado) en los valores del NDVI entre los años 2000 y 2005, restringiéndose la vegetación solo al cauce principal. Fuente: Elaboración propia.





**Figura 7.27. NDVI de la microcuenca 4, año 2010.** No existen cambios significativos, es más, se registra una disminución del NDVI en comparación a los años anteriores. Al no existir obras de restauración, la microcuenca por sí sola no es capaz de encauzar las aguas de los eventos pluviométricos ni sortear los efectos de la erosión. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 7.28. Cuantificación del factor NDVI para la microcuenca 4.** Los valores del NDVI son más bajos en esta microcuenca en incluso bajan a partir del año 2000 lo que indica una baja biomasa en comparación a las microcuencas anteriores, debido a la inexistencia de obras y por ende a la menor capacidad de la microcuenca de resistir los procesos erosivos. Fuente: Elaboración propia.

### 7.1.2. Análisis morfométrico de las microcuencas

El análisis morfométrico de una cuenca establece parámetros cuantitativos que ofrecen información acerca de la forma y comportamiento de la misma. De esta manera se pueden estimar aspectos como crecidas, probabilidad de erosión, forma, comportamiento de los cauces mayores, etc... Los parámetros determinados son de forma, relieve, relativos a la red hidrográfica y relativos a la red de drenaje en función de los órdenes de causas.

“El análisis morfométrico de una cuenca de drenaje es de gran importancia para comprender e interpretar su comportamiento morfodinámico e hidrológico, así como para inferir indirecta y cualitativamente la estructura, características y formas de los hidrogramas resultantes de eventos de crecidas (respuesta hidrológica). También permiten analizar y comprender los elementos geométricos básicos del sistema, que ante la presencia de externalidades (precipitaciones extremas por ejemplo), interactúan para originar y/o activar procesos geomorfológicos (movimientos de masa) de vertientes y aludes torrenciales” (Méndez y Marcucci, 2006).

Índice	Microcuencas			
	1	2	3	4
Superficie de la cuenca (Km <sup>2</sup> )	0,14	0,17	0,56	0,35
Perímetro (Km)	1,81	2,02	3,67	3,03
Índice de Gravellius	1,35	1,38	1,39	1,43
Factor de forma	0,29	0,35	0,22	0,37
Rectángulo equivalente	L(Km)	0,70	0,79	1,44
	I (Km)	0,19	0,21	0,38
Radio equivalente (Km)	0,05	0,15	0,25	0,15

**Tabla 7.1. Parámetros de forma.** Los parámetros morfométricos relativos a la forma permiten establecer aspectos topográficos y determinar comparaciones entre cuencas. Por ejemplo, la superficie de la cuenca ofrece una idea de la magnitud de la misma; cuencas con la misma área y el mismo perímetro pueden tener formas diferentes, lo cual crea también dos comportamientos diferentes en la generación de las crecidas. Para evaluar la forma se usan índices que dan una idea numérica de esta. Fuente: Elaboración propia.

La forma de las microcuencas está determinada [entre otros] por patrones topográficos y climáticos, por lo que responderán en forma distinta a los efectos naturales y antrópicos que ocurran en ella. Gómez (2002), establece los parámetros morfométricos de forma que cuantificados para las microcuencas de Alto Loica se muestran en la tabla 7.1. Muchas cuencas pueden tener la misma superficie e incluso mismo perímetro, pero, tener claras diferencias en cuanto a su superficie y forma, por lo que responderán en forma distinta a pluviométricos y/o antrópicos.

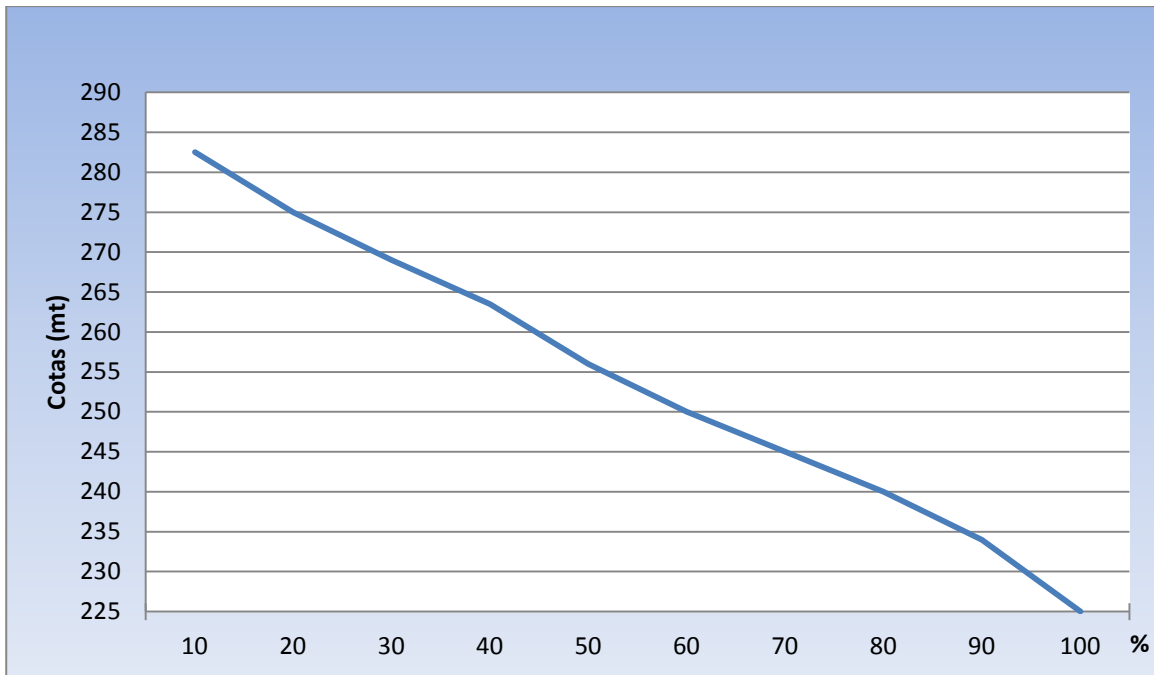
Las microcuencas de Alto Loica tienen en promedio una superficie de 30,50 ha y un perímetro de 2,63 Km, siendo la microcuenca 3 quien presenta la mayor superficie con 56

ha y un perímetro de 3,67 Km. El análisis del índice de Gravellius, indica que la microcuenca 4 presenta el valor más alto este parámetro lo cual indica que su tendencia es a ser una cuenca alargada. A su vez, la microcuenca 3 tiene el valor "L" más alto en comparación a las microcuencas 1, 2 y 4. En el caso de esta última, presenta la mayor diferencia en cuanto a las longitudes de los lados del rectángulo equivalente, lo cual se complementa con su alto valor de Gravellius, el cual, indica que su tendencia es a ser una cuenca ovalada. En el caso del factor de forma no hay grandes diferencias, Nanía (2003), establece que mientras más bajo este valor, la cuenca esta menos sujeta a crecidas; en este caso la microcuenca 3 es la que está menos sujeta a crecidas y la 4, más sujeta a crecidas.

Otro elemento importante es la superficie en función de altitud (Suarez y Bravo, 2005), el área parcial acumulada por intervalo de altitud da origen a la curva hipsométrica, la cual establece el porcentaje de área que se encuentra a una altitud determinada y a intervalos previamente establecidos.

Cotas intervalos (m)	Cota media intervalo	Área Parcial (m <sup>2</sup> )	Área Acumulada (m <sup>2</sup> )	Área Parcial (%)	Área Acumulada (%)
285 – 290	287,50	9898	9898	7,07	7,070
280 – 285	282,50	9548	19446	6,82	13,89
275 – 280	277,50	9758	29204	6,97	20,86
270 – 275	272,50	10444	39648	7,46	28,32
265 – 270	267,50	12866	52514	9,19	37,51
260 – 265	262,50	10332	62846	7,38	44,89
255 – 260	257,50	10374	73220	7,41	52,30
250 – 255	252,50	10556	83776	7,54	59,84
245 – 250	247,50	13412	97188	9,58	69,42
240 – 245	242,50	16072	113260	11,48	80,90
235 – 240	237,50	10776	124036	7,69	88,59
230 – 235	232,50	13300	137336	9,50	98,09
225 – 230	227,50	2562	140000	1,83	100,0

**Tabla 7.2. Cotas y áreas de la microcuenca 1.** Las altitudes en la microcuenca 1 originan 13 intervalos (con una diferencia de 5 metros) con áreas parciales relativamente regulares. La superficie de mayor extensión de encuentra entre los 240 y 245 mt abarcando una extensión de 16072 m<sup>2</sup>, lo que equivale a un 11,48 % de la superficie total de la microcuenca. Fuente: Elaboración propia.

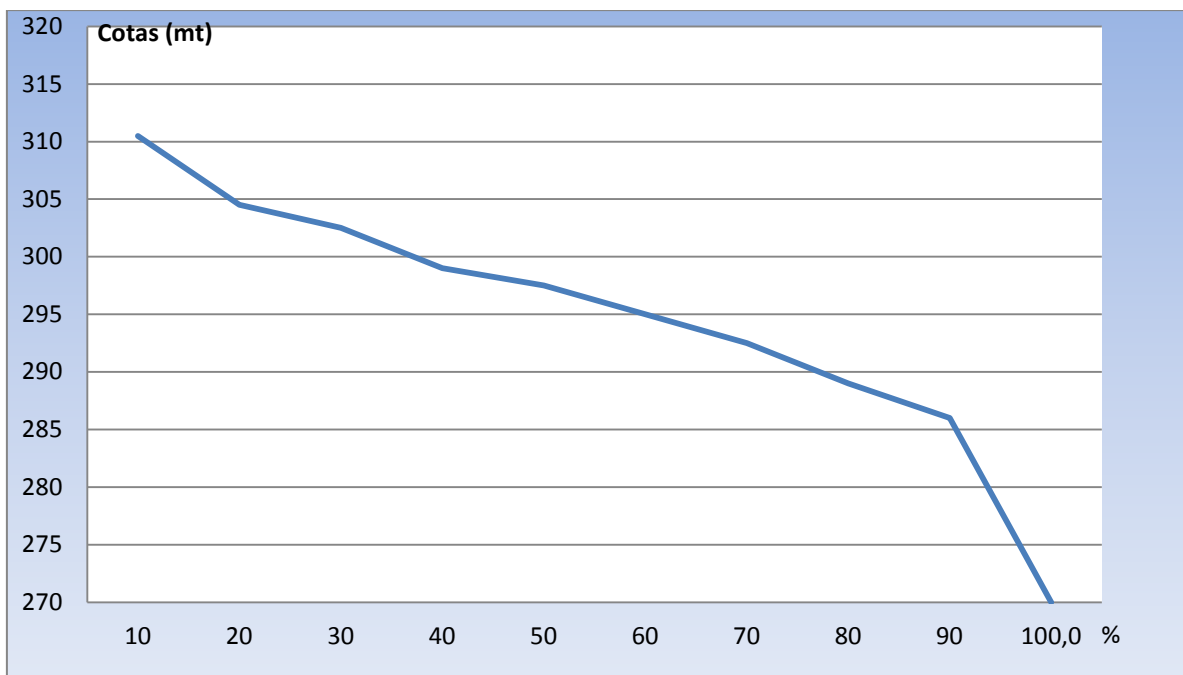


**Figura 7.29. Curva hipsométrica microcuencia 1.** La curva en esta microcuencia es lineal sin oscilaciones pronunciadas ni zonas de transición, lo que indica cierta uniformidad en la continuidad del relieve y zonas relativamente regulares entre las cotas de altitud. No se deriva la presencia de valles extensos ni cumbres muy escarpadas, aunque, puede estimarse la presencia de eventos pluviométricos tales como una fuerte escorrentía en la época invernal. Fuente: Elaboración propia.

Cotas intervalos (m)	Cota media intervalo	Área Parcial (m <sup>2</sup> )	Área Acumulada (m <sup>2</sup> )	Área Parcial (%)	Área Acumulada (%)
315 – 320	317,50	5066	5066	2,98	2,98
310 – 315	312,50	13889	18995	8,17	11,15
305 – 310	307,50	15504	34459	9,12	20,27
300 – 305	302,50	30924	65383	17,82	38,09
295 – 300	297,50	38981	104364	22,93	61,02
290 – 295	292,50	28866	133230	16,98	78,00
285 – 290	287,50	26229	159459	15,47	93,47
280 – 285	282,50	4811	164270	2,83	96,30
275 – 280	277,50	3876	168146	2,28	98,58
270 – 275	272,50	2346	170492	1,38	100,0

**Tabla 7.3. Cotas y áreas de la microcuencia 2.** Esta microcuencia presenta elevaciones mayores que la anterior alcanzando altitudes superiores a los 135 msnm. La segmentación de 5 mt en las curvas de nivel dan origen a 10 intervalos con irregularidades en el relieve alcanzando superficies de 2346 m<sup>2</sup> (1,38 % de la superficie total) y 38981 m<sup>2</sup> entre los 295 y 300 mt, lo que significa el 22,93 % de la superficie de la microcuencia. Fuente: Elaboración propia.

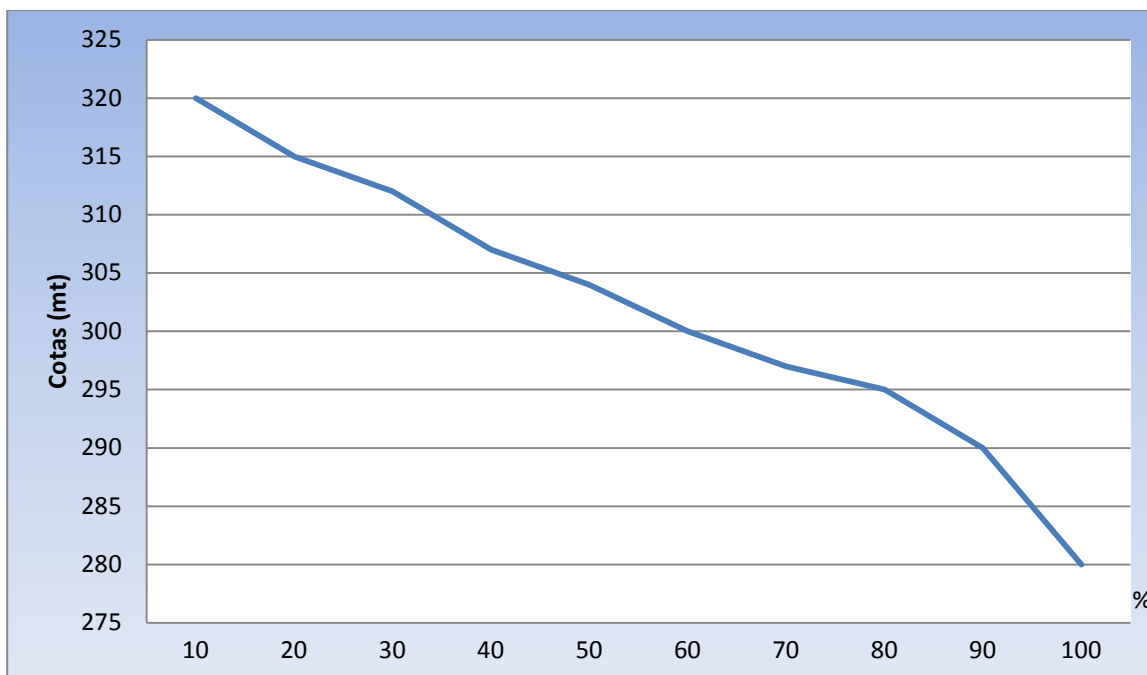




**Figura 7.30. Curva hipsométrica microcuencia 2.** La curva de la microcuencia 2 presenta diferencias significativas en comparación a la anterior presentando una continuidad lineal entre los 285 y 305 metros. Sin embargo, se observa una fuerte pendiente a partir de los 285 metros lo que indica un cambio brusco en el relieve, lo que en cierta manera justifica las diferentes obras de restauración situadas en la zona baja de la microcuencia, las cuales están destinadas a evitar el arrastre de sedimentos en la época invernal. Fuente: Elaboración propia.

Cotas intervalos (m)	Cota media intervalo	Área Parcial (m <sup>2</sup> )	Área Acumulada (m <sup>2</sup> )	Área Parcial (%)	Área Acumulada (%)
315 – 320	317,50	53306	53306	9,37	9,37
310 – 315	312,50	66789	120095	11,23	20,6
305 – 310	307,50	66789	186884	11,74	32,34
300 – 305	302,50	80272	267156	14,11	46,45
295 – 300	297,50	90967	358123	15,99	62,44
290 – 295	292,50	120550	478673	21,19	83,63
285 – 290	287,50	53647	532320	9,43	93,06
280 – 285	282,50	29412	561732	5,17	98,23
275 – 280	277,50	7168	570517	1,72	100,00

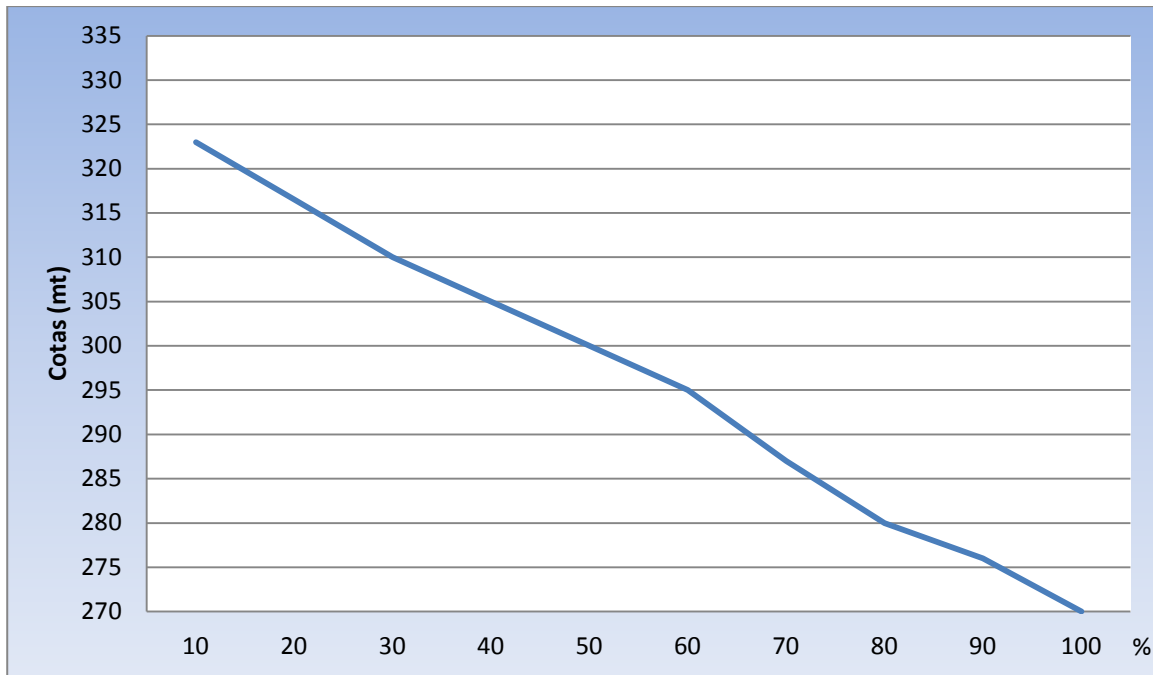
**Tabla 7.4. Cotas y áreas de la microcuencia 3.** En esta microcuencia hay 9 intervalos con cotas que fluctúan entre los 275 y 320 msnm. A diferencia de la microcuencia 1, hay discontinuidades en el relieve lo cual origina áreas parciales con diferencias significativas como 1,72 % y 21,19%. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 7.31. Curva hipsométrica microcuenca 3.** La curva comienza con una pendiente que pierde linealidad a los 295 mt originando una discontinuidad que indica un cambio en el relieve. La curva muestra la presencia de valles profundos y quebradas que aumentan su pendiente al acercarse a los 290 metros con lo que se puede inferir una fuerte escorrentía en la época invernal. Fuente: Elaboración propia.

Cotas intervalos (m)	Cota media intervalo	Área Parcial (m <sup>2</sup> )	Área Acumulada (m <sup>2</sup> )	Área Parcial (%)	Área Acumulada (%)
330 – 335	332,50	14595	14595	4,17	4,17
325 – 330	327,50	13545	28140	3,87	8,04
320 – 325	322,50	20720	48860	5,92	13,96
315 – 320	317,50	31325	80185	8,95	22,91
310 – 315	312,50	26915	107100	7,69	30,60
305 – 310	307,50	31325	138425	8,95	39,55
300 – 305	302,50	35455	173880	10,13	49,68
295 – 300	297,50	33845	207725	9,67	59,35
290 – 295	292,50	27895	235620	7,97	67,32
285 – 290	287,50	22085	257705	6,31	73,63
280 – 285	282,50	25165	282870	7,19	80,82
275 – 280	277,50	44625	327495	12,75	93,57
270 – 275	272,50	22260	350000	6,36	100,0

**Tabla 7.5. Cotas y áreas de la microcuenca 4.** En la microcuenca testigo, se generan 13 intervalos con cotas que fluctúan entre los 275 y 225 msnm. Las áreas parciales resultantes son relativamente continuas, salvo ciertos cercanos a los 325. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 7.32. Curva hipsométrica microcuenca 4.** La microcuenca testigo presenta una continuidad a lo largo de toda la curva; no hay una fuerte pendiente en el origen en comparación con las cotas inferiores lo que minimiza el peligro de inundación. No se visualizan zonas de transición, lo que implica que en esta microcuenca no hay valles extensos, solo valles profundos y sectores planos en la zona baja. Fuente. Elaboración propia.

Las curvas hipsométricas de las microcuencas de Alto loica no presentan una inclinación muy pronunciada en el origen lo que implica que las pendientes no representan una variable de alta incidencia (aunque sí de influencia) en el riesgo de posibles inundaciones que se generen en la época invernal. Aunque, en determinadas zonas es factible encontrar zonas pronunciadas a las cuales se suma el hecho de encontrar un estado de erosión severo a muy severo lo que significa una ausencia de la cubierta vegetal lo que a su vez conlleva a la pérdida de suelo.

Es notorio además, el hecho que las curvas indican la ausencia de grandes extensiones o planicies, lo que se grafica con curvas que no son cóncavas hacia arriba, sino, que son lineales (con excepciones puntuales) en forma descendente sin formar zonas estacionarias que indiquen un cambio brusco de relieve; por el contrario, las microcuencas presenta zonas de quebradas muy accidentadas pero sin grandes elevaciones.

Su conformación guarda estrecha relación a su vez con el comportamiento hidrológico de la microcuenca; de las curvas hipsométricas puede deducirse que aspectos como la infiltración y humedad del suelo (sumado a la alta tasa de erosión) son considerablemente bajas en relación a sectores relativamente planos y con baja pendiente. En cambio, el escurrimiento superficial es alto en todas las microcuencas en estudio, alterando la estabilidad de la ellas y los procesos de equilibrio geohidrológico. Si bien dicha situación se ha amortiguado con la implementación de obras de restauración, aun es un fenómeno observable en determinados lugares donde las obras están ausentes.

Índice	Microcuencas			
	1	2	3	4
Altitud máxima (msnm)	290	320	320	335
Altitud mínima (msnm)	225	270	275	270
Amplitud de relieve (mt)	65	50	45	65
Altura media (mt)	254	294	292	296
Altura mediana (mt)	256	297,5	304	300
Pendiente media de la cuenca (%)	11,18	10,15	6,84	10,82
Coefficiente orográfico	453	501	151	245
Coefficiente de masividad (mt/Km <sup>2</sup> )	1814	1729	521	845

**Tabla 7.6. Parámetros de relieve.** Estos parámetros definen aspectos relativos a las alturas y sus pendientes así como las variables que interrelacionan dichos aspectos. Las altitudes –que fluctúan entre los 225 y los 335 msnm, son similares por encontrarse en el mismo lugar. El alto valor tomado por el coeficiente de masividad indica que las microcuencas son relativamente pequeñas (entre 14 y 35 hectáreas) y son microcuencas de montaña. Fuente: Elaboración propia.

Índice	Microcuencas			
	1	2	3	4
Longitud del cauce principal (mt)	689,13	696,97	1570	963,33
Frecuencia de drenaje (Km <sup>-1</sup> )	28,57	64,70	12,5	40
Densidad de drenaje (Km <sup>-1</sup> )	6,24	9,63	4,85	6,60
Longitud promedio flujo superficial (mt <sup>-1</sup> )	0,04	0,02	0,05	0,03
Coefficiente de torrencialidad (Km <sup>-1</sup> )	21,42	47,05	8,92	28,57
Distancia Boca – Centro de gravedad (mt)	220	343,25	150	540
Distancia Boca – Punto más alejado (mt)	700	687	1500	1100
Amplitud de cota (mt)	55	40	45	55
Pendiente media cauce principal (%)	7,98	5,73	2,86	5,70
Factor de irrigación <sup>97</sup>	0,50	0,14	0,33	0,11
Densidad de irrigación <sup>98</sup> (Km <sup>-1</sup> )	14,28	41,17	5,35	25,71

**Tabla 7.7. Parámetros relativos a la red hidrográfica.** Los valores en la tabla tienen directa relación con el comportamiento de la red de cauces en las microcuencas. Aspectos como centro de gravedad, longitud de cauce principal y pendiente influyen en aspectos como crecidas, torrencialidad, e irrigación en las cuencas de Alto Loica. Fuente: Elaboración propia.

El cauce más extenso está presente en la microcuenca 3, el cual presenta una longitud mayor que la distancia boca – punto más alejado lo que indica que el cauce presenta

<sup>97</sup> Este parámetro morfométrico está contemplado como una de las originalidades de este trabajo. El Factor de irrigación se diseñó como un parámetro adimensional.

<sup>98</sup> Iden

mayores curvaturas aumentado la zona irrigada. En lo que respecta a los desbordes durante las crecidas, la mayor probabilidad está en la microcuenca 3 debido a la baja distancia desde la boca al punto de gravedad, considerando que la distancia de este punto hasta el lugar más alejado es de 1350 metros. El centro de gravedad más alto está en la microcuenca 2 y 4 lo que disminuye la probabilidad de desbordes en la época invernal. En la microcuenca 2 la frecuencia de drenaje supera ampliamente a las otras microcuencas, esto indica la mayor probabilidad que las gotas de lluvia encuentren un cauce en menor tiempo. En la microcuenca 3 en cambio, este valor disminuye drásticamente. De la misma forma, la densidad de drenaje y el coeficiente de torrencialidad alcanzan su máximo valor en la microcuenca 2. Este último parámetro que indica la relación entre cauces tipo 1 y la superficie de una cuenca (Méndez y Marcucci, 2006), establece que la concentración de las precipitaciones es mayor en la microcuenca 2. En el caso del primero, la densidad de drenaje toma un valor inferior a 14, lo cual se considera bajo para una textura grosera.

La irrigación tiene múltiples indicadores, pero se consideran 2, los cuales son el factor de irrigación y la densidad de irrigación. El primero se establece mediante el recíproco del número de nodos, disminuyendo a medida que los nodos aumentan y por lo tanto inversamente proporcional a la irrigación de la cuenca, alcanzando su valor más bajo en la microcuenca 4, siendo a su vez, la menos irrigada la microcuenca 2. Esta última además, presenta el mayor número de nodos por Km<sup>2</sup> (tiene el valor más alto en cuanto a la densidad de irrigación).

Densidad de drenaje	Valor de "D"	Textura
Baja	3 – 14	Grosera
Media	12 – 16	Media
Alta	30 – 40	Fina
Muy Alta	200 – 500	Ultrafina

**Tabla 7.8. Densidad de drenaje y la textura de los materiales en relación con el valor de D.** La clasificación o tipo de densidad de drenaje está en función de la textura y el valor respectivo. Fuente: Gómez, 2002.

### 7.1.3. Cuantificación de los impactos ambientales en las microcuencas de Alto Loica

Para cuantificar la situación y la problemática ambiental en las microcuencas de Alto Loica, el modelo se basó en 3 factores<sup>99</sup> (suelo, agua y vegetación) en los cuales y según el estado de estos se catalogaron 5 parámetros dándose un valor previamente calificado según el estado de los 3 factores.

En la tabla 7.9 se muestran los valores de cada microcuenca para cada uno de los parámetros en los 3 factores medidos antes del incendio que azotó a Alto Loica y en la tabla 7.10 se muestran los valores para las microcuencas 2 y 4 en el estado actual después del incendio.

Esto último solo aplicado a las microcuencas que fueron arrasadas por el fuego, con lo cual, cambio drásticamente el panorama y futuro ambiental de las microcuencas 2 y 3. Aunque se prevé una mayor sedimentación y pérdida de suelo, se espera que las puedan rebrotar ciertas especies (como romerillo y espinos).



**Figura 7.33. Aspectos a evaluar en las microcuencas.** Factores y subfactores a evaluar en las microcuencas de trabajo. Cada subfactor será cuantificado según aspectos previamente definidos. Fuente: Elaboración propia.

En cada elemento que se cuantificó se consideraron subfactores (descritos en la figura anterior), para describir dicho parámetro. Se consideró a estos elementos debido a que existía suficiente información del proyecto para levantar un patrón cuantitativo y además son los elementos más representativos en cuanto a daño ecológico. Cada uno de estos elementos fue cuantificado con el patrón asignado y se efectuó la sumatoria correspondiente llevándose estos elementos a las ecuaciones respectivas para obtener el valor específico que representa el grado de daño según la codificación hecha previamente.

<sup>99</sup> De las 3 matrices ambientales el modelo solo contempla 2 de ellas (el tercer factor es la vegetación). De esta manera se omite la matriz atmósfera, debido a que no representa un problema ambiental en la zona. Distinto sería si el modelo se aplicara en zonas saturadas como el centro de Santiago.

Microcuenca	Factor	Subfactor	A	P	C	R	I	PIC <sub>1</sub>	PIC <sub>2</sub>	PIC <sub>3</sub>
1	Suelo	Erosión	5	8	8	10	6	7.63	22,71	853
		Desertificación	5	8	8	10	6	7.63		
		Compactación	1	8	8	10	6	7.45		
	Agua	Sedimentación	5	8	6	10	4	7.35	22,05	
		Turbidez	5	8	6	10	4	7.35		
		Pérdida de vida animal	5	8	6	10	4	7.35		
	Vegetación	Pérdida de abundancia	5	8	6	8	6	7.41	22,23	
		Pérdida de biodiversidad	5	8	6	8	6	7.41		
		Pérdida de cobertura	5	8	6	8	6	7.41		
2	Suelo	Erosión	5	2	4	4	4	6.60	19,90	820
		Desertificación	5	2	4	4	4	6.60		
		Compactación	1	4	4	6	4	6.70		
	Agua	Sedimentación	5	4	4	4	4	6.67	20,01	
		Turbidez	5	4	4	4	4	6.67		
		Pérdida de vida animal	5	4	4	4	4	6.67		
	Vegetación	Pérdida de abundancia	5	2	4	4	4	6.60	19,99	
		Pérdida de biodiversidad	5	2	4	6	4	6.79		
		Pérdida de cobertura	5	2	4	4	4	6.60		

**Tabla 7.9. Cuantificación de los problemas presentes en las microcuencas antes del incendio.** Los problemas son distintos según los diferentes elementos topográficos, geomorfológicos y vegetacionales que están presentes en ellas. La tabla muestra la cuantificación de los problemas ambientales en las microcuencas de trabajo antes del incendio. Fuente. Elaboración propia.

A: Amplitud geográfica  
P: Probabilidad de daño colateral  
C: Consecuencia

R: Reversibilidad  
I: Impacto poblacional

PIC<sub>1</sub>: Parámetro de impactos en cuencas para un subfactor  
PIC<sub>2</sub>: Parámetro de impactos en cuencas para varios factores

Continuación tabla 7.9

Microcuenca	Factor	Subfactor	A	P	C	R	I	PIC <sub>1</sub>	PIC <sub>2</sub>	PIC <sub>3</sub>
3	Suelo	Erosión	5	8	6	6	6	7.26	21,48	837
		Desertificación	5	8	6	6	6	7.26		
		Compactación	1	4	6	8	4	6.96		
	Agua	Sedimentación	5	6	6	6	2	6.74	20,22	
		Turbidez	5	6	6	6	2	6.74		
		Pérdida de vida animal	5	6	6	6	2	6.74		
	Vegetación	Pérdida de abundancia	5	6	6	6	4	7.03	21,36	
		Pérdida de biodiversidad	5	6	8	8	4	7.27		
		Pérdida de cobertura	5	8	6	6	4	7.06		
4	Suelo	Erosión	5	8	8	10	6	7.63	22,63	848
		Desertificación	5	8	8	10	6	7.63		
		Compactación	1	4	8	10	6	7.37		
	Agua	Sedimentación	5	6	6	8	2	6.90	20,65	
		Turbidez	5	6	6	8	2	6.90		
		Pérdida de vida animal	5	4	6	8	2	6.85		
	Vegetación	Pérdida de abundancia	5	8	6	8	4	7.22	21,87	
		Pérdida de biodiversidad	5	8	8	10	4	7.43		
		Pérdida de cobertura	5	8	6	8	4	7.22		



Microcuenca	Factor	Subfactor	A	P	C	R	I	PIC <sub>1</sub>	PIC <sub>2</sub>	PIC <sub>3</sub>
2	Suelo	Erosión	5	2	6	8	4	7.06	21,08	841
		Desertificación	5	2	6	8	4	7.06		
		Compactación	1	4	6	8	4	6.96		
	Agua	Sedimentación	5	4	6	8	4	7.14	21,42	
		Turbidez	5	4	6	8	4	7.14		
		Pérdida de vida animal	5	4	6	8	4	7.14		
	Vegetación	Pérdida de abundancia	5	6	8	10	4	7.40	22,15	
		Pérdida de biodiversidad	5	4	8	10	4	7.35		
		Pérdida de cobertura	5	6	8	10	4	7.40		
3	Suelo	Erosión	5	8	6	8	6	7.41	21,78	843
		Desertificación	5	8	6	8	6	7.41		
		Compactación	1	4	6	8	4	6.96		
	Agua	Sedimentación	5	6	6	8	2	6.90	20,70	
		Turbidez	5	6	6	8	2	6.90		
		Pérdida de vida animal	5	6	6	8	2	6.90		
	Vegetación	Pérdida de abundancia	5	6	8	10	4	7.40	22,15	
		Pérdida de biodiversidad	5	4	8	10	4	7.35		
		Pérdida de cobertura	5	6	8	10	4	7.40		

**Tabla 7.10. Cuantificación de los problemas presentes en las microcuencas después del incendio.** La tabla muestra los problemas ambientales ocasionados en las microcuencas quemadas, por ello, en la tabla se cuantifican solo las microcuencas 2 y 3 en su estado actual (después del incendio). Fuente. Elaboración propia.

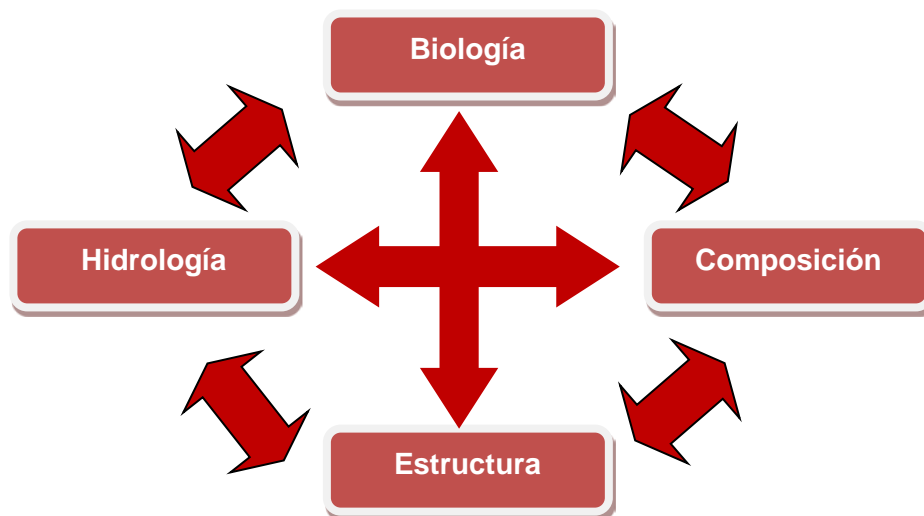
## 7.2. DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS INTEGRAL DE SUELOS

“El suelo es el producto de la transformación de sustancias minerales y orgánicas en la superficie de la Tierra, bajo la influencia de factores ambientales que han venido operando durante un largo período de tiempo, con una organización y morfología definidas.” (Cortes, 2007)

Según Cortes (2007) el suelo es un “Sistema biogeoquímico, abierto y dinámico, que constantemente intercambia materia y energía con la biósfera, la atmósfera y la hidrósfera”. Esto significa que el suelo es un elemento que interactúa con diversos elementos de distinta naturaleza con la capacidad de establecer equilibrios en el comportamiento de los diversos elementos que lo componen. El conocimiento integral de estos elementos es clave para poder comprender el funcionamiento del suelo y por ende, su capacidad de otorgar bienes y servicios.

Para efectos prácticos del trabajo –y tal como se estipuló en el capítulo 5– el análisis integral de suelos contempló 4 áreas: químico, físico, hidrológico y biológico. El primero implicó la concentración de los micro y macronutrientes del suelo además de la determinación de propiedades como la CIC; pH y CE. El análisis físico contempló los aspectos estructurales del suelo y la conformación de los horizontes. La determinación de la estructura del suelo es clave para entender su funcionamiento y su relación con los procesos naturales.

El comportamiento del agua en el suelo y la distribución de ésta en los cauces naturales de las microcuencas son determinantes para entender características como la irrigación y la distribución de las especies arbóreas. Finalmente, las especies microbiológicas (bacterias y hongos) son claves para procesos como amonificación y mineralización de la materia orgánica en los ciclos biogeoquímicos, los que a su vez, permiten el sustento de plantas y animales a través del flujo de materia y energía entre el suelo y su entorno.



**Figura 7.34. Relación entre las dimensiones que componen la morfofuncionalidad del suelo.** Al hablar de la composición, se habla de la composición química; y la estructura hace alusión al perfil del suelo (dimensión física). Estas dos dimensiones, más los componentes hidrológico y biológico; configuran una compleja gama de interrelaciones que determinan la morfofuncionalidad de un suelo y su capacidad para generar bienes y servicios. Fuente: Elaboración propia.

### 7.2.1. Análisis químico

El análisis químico de los suelos de las microcuencas de Alto Loica consistió básicamente en cuantificar ciertos componentes básicos del suelo, así como la concentración de macronutrientes y micronutrientes del suelo.

Parámetros	Macronutrientes	Micronutrientes
pH	N	Fe
CIC	P	Zn
M.O.	K	Mn
C.E.		Cu
		Ca
		B

**Tabla 7.11. Elementos cuantificados en los suelos de Alto Loica.** El análisis incluyó la determinación del pH, la capacidad de intercambio catiónico (CIC), la materia orgánica (MO), conductividad eléctrica (CE) y determinación de las macronutrientes y micronutrientes. Fuente: elaboración propia.

Para ello se escogieron 8 puntos de muestreo: un punto en la microcuencas 1, cinco puntos en la microcuenca 2, un punto en la microcuenca 3 y un punto en la microcuenca 4. En número de puntos de muestreo por microcuencas, obedeció a aspectos muy precisos<sup>100</sup> como topografía, pendiente, obra de restauración presente y reforestación; dado que estos aspectos son muy variados en la microcuenca 2, la mayor parte de los muestreos correspondieron a esta microcuenca. Cada punto fue georreferenciado obteniéndose las características del lugar del muestreo, así como los aspectos topográficos y vegetacionales del lugar.

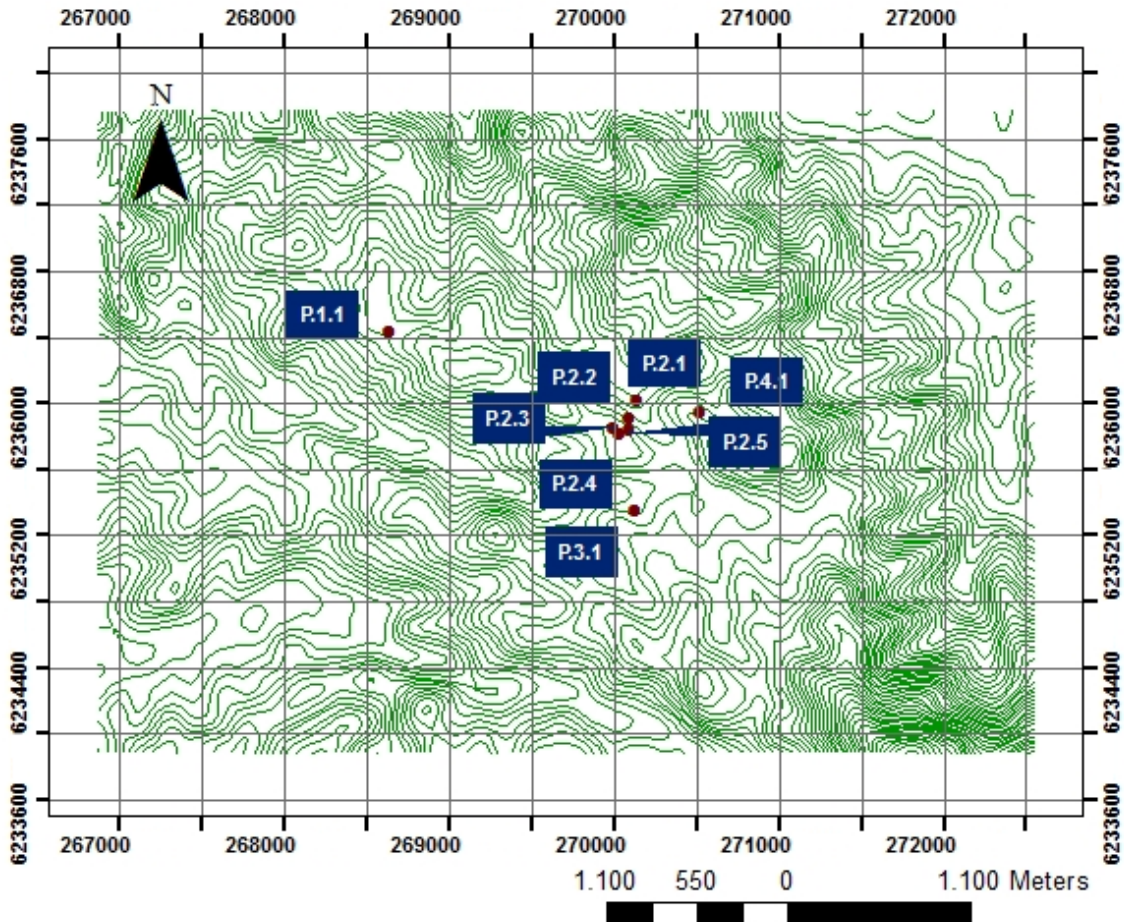
De cada punto se tomaron 4 muestras correspondientes a cada horizonte del pedón para establecer las concentraciones de cada horizonte del suelo. Las concentraciones obtenidas son muy diversas aunque muchas de ellas se mantienen en ciertos márgenes o presentan determinados comportamientos que se enmarcan en niveles acordes con los parámetros del suelo.

Las concentraciones de determinados elementos suben a medida que aumenta la profundidad, mientras que otros elementos disminuyen a medida que la profundidad aumenta. En otros lugares, la materia orgánica juega un papel fundamental al aumentar la concentración de determinados elementos en los horizontes superficiales contribuyendo con ello al aumento de la actividad microbiana que favorece la mineralización de ciertos compuestos, los cuales, se integran a los ciclos biogeoquímicos. Las concentraciones de los elementos en el suelo se deben a una conjunción de variables, como la topografía, erosión, materia orgánica, profundidad del horizonte y especies vegetales; esto último es determinante para ciertos elementos –como por ejemplo el litio– cuya concentración disminuye en presencia de eucaliptus.

<sup>100</sup> Cortés (2007) estipula determinadas metodologías para obtener muestras de suelo, sin embargo, los aspectos considerados para efectuar los muestreos en las microcuencas no obedecieron a sus postulados. Esto debido a la naturaleza del lugar y los múltiples factores que están incidiendo en dicho lugar de trabajo.

### 7.2.1.1. Caracterización de los puntos de muestra

Los puntos de muestra se tomaron en función de las obras presentes en las microcuencas. Dado que la mayoría de ellas están en la microcuenca 2, la mayoría de las muestras (5) se tomaron en este lugar, solo se consideró un punto de muestreo por cada una de las microcuencas restantes.



**Figura 7.35. Grid de puntos de muestreo.** En color burdeos se aprecian los puntos de muestreo (8) para el análisis químico y físico de las microcuencas. Se tomó un punto en la microcuenca 1; 5 puntos en la microcuenca 2; 1 punto en la microcuenca 3 y 1 punto en la microcuenca testigo (4). Fuente: Elaboración propia.

Para caracterizar cada uno de los lugares en los cuales se tomaron las muestras se utilizó la metodología descrita por Schlatter y colaboradores (2003), describiendo la localización, características topográficas y vegetacionales del lugar. La ubicación de los puntos de muestra resulta clave para la determinación de las características físicas y químicas del suelo en los cuales se han implementado obras de restauración hidrológico – forestal, en comparación con la microcuenca 4 en la cual no se ha implementado ningún tratamiento. Los análisis físicos y químicos se hicieron con las muestras recolectadas en estos puntos.

PARAMETROS	CARACTERISTICAS
<b>Localización (UTM)</b>	0268643 / 6236432 (WGS 84)
<b>Forma de terreno</b>	Terreno intermedio. Ondulado a quebrado
<b>Obra presente</b>	Zanjas de infiltración
<b>Posición fisiográfica</b>	Lomaje
<b>Ubicación en el relieve</b>	Ladera
<b>Forma de la ladera</b>	Recta
<b>Forma del contorno</b>	Convexo
<b>Drenaje externo</b>	Rápido
<b>Elevación (msnm)</b>	296
<b>Exposición</b>	Este
<b>Pendiente</b>	Grados (°): 30 – 45 Porcentaje (%): 58 – 100 Denominación: Escarpado Clase de pendiente Muy escarpada
<b>Estrato arbóreo</b>	Plantación forestal con especies exóticas, arbustos aislados y piso con herbáceas de estación. Las especies preponderantes son eucaliptus y pinos con una altura superior a los 5 metros.
<b>Uso anterior</b>	Extracción de leña
<b>Uso actual</b>	Conservación y reforestación
<b>Capacidad de uso</b>	VI

**Tabla 7.12. Caracterización del punto de muestreo de la microcuenca 1.** El lugar se encuentra a la entrada de la microcuenca en la ladera este. Las zanjas de infiltración se encuentran en gran parte de la ladera con el fin de facilitar la infiltración de agua en el suelo para que sea aprovechada por las especies arbóreas del lugar, dado lo marcado de las estaciones en estas zonas de secano. Fuente: Elaboración propia.

PARAMETROS	PUNTOS DE MUESTREO				
	Punto 2.1	Punto 2.2	Punto 2.3	Punto 2.4	Punto 2.5
<b>Localización (UTM)</b>	0270145 / 6236015	0270087 / 6235906	0270002 / 6235844	0270031 / 6235815	0270098 / 6235840
<b>Forma de terreno</b>	Terreno intermedio. Ondulado a quebrado	Terreno intermedio. Ondulado a quebrado	Terreno intermedio. Ondulado a quebrado	Terreno intermedio. Ondulado a quebrado	Terreno intermedio. Ondulado a quebrado
<b>Obra presente</b>	Estación de aforo	No se registran obras en el lugar	Zanja de infiltración	Zanja de infiltración	Muretes de sacos
<b>Posición fisiográfica</b>	Lomajes	Lomajes	Terraza	Terraza	Terraza
<b>Ubicación en el relieve</b>	Piedmont	Hondonada	Ladera	Ladera	Ladera
<b>Forma de la ladera</b>	Convexa	Convexa	Convexa	Convexa	Convexa
<b>Forma del contorno</b>	Cóncavo	Cóncava	Convexo	Convexo	Convexo
<b>Drenaje externo</b>	Lento	Moderado	Moderado	Moderado	Rápido
<b>Elevación (msnm)</b>	286	300	320	320	300
<b>Exposición</b>	N.W.	S.E.	N.E.	N.E.	N.E.
<b>Pendiente</b>					
Grados (°)	2 – 3	9 – 17	6 – 9	3 – 6	17 – 30
Porcentaje (%)	3 – 5	15 – 30	0 – 15	5 – 10	30 – 58
Denominación	Casi plano	Inclinación pronunciada	Inclinado	Ligeramente inclinado	Inclinación muy pronunciada
Clase de pendiente	Suave	Pronunciada	Moderada	Moderada	Pronunciada

**Tabla 7.13. Caracterización de los puntos de muestreo de la microcuenca 2.** En la tabla se indican las características de los 5 puntos de muestreo de la microcuenca 2. Fuente. Elaboración propia.

Continuación tabla 7.13

PARAMETROS	PUNTOS DE MUESTREO				
	Punto 2.1	Punto 2.2	Punto 2.3	Punto 2.4	Punto 2.5
<b>Estrato arbóreo</b>	Bosque mixto de especies exóticas y nativas de hoja caduca. Los pastos son altos con presencia de herbáceas de estación. Las especies preponderantes son el pino, aramo y quillay. Los árboles son de gran envergadura y con una alta densificación	Bosque cerrado con especies exóticas y pastos altos de estación. Predominan los eucaliptus de gran altura y arbustos con una altura no mayor a 1,5 mt.	Bosque compuesto por plantación forestal con especies exóticas donde predominan los pinos. Los pastos superan los 15 cm y las hierbas estivales son abundantes en este sector. Las especies nativas aquí no son comunes hallándose solo 2 quillayes.	Bosque de plantación forestal con herbáceas que predominan en los meses de invierno y que no sobrepasan los 15 cm de altura. Predominan los eucaliptus en forma abierta (no en grandes conglomerados), aunque, de gran altura; muchos individuos superan los 6 metros	Bosque abierto de plantación forestal, en el cual, no hay presencia de herbáceas. Predominan los pinos y pequeños arbustos en forma aislada. Los pinos son de gran tamaño (sobre los 7 metros) en la parte superior de la obra.
<b>Uso anterior</b>	Extracción de leña	Extracción de leña	Extracción de leña	Extracción de leña	Extracción de leña
<b>Uso actual</b>	Conservación y reforestación	Conservación y reforestación	Conservación y reforestación	Conservación y reforestación	Conservación y reforestación
<b>Capacidad de uso</b>	VI	VI	VI	VI	VI

PARAMETROS	PUNTOS DE MUESTREO	
	Punto 3.1	Punto 4.1
<b>Localización (UTM)</b>	0270128 / 6235347	0270523 / 6235947
<b>Forma de terreno</b>	Terreno intermedio. Ondulado a quebrado	Terreno intermedio. Ondulado a quebrado
<b>Obra presente</b>	Dique de postes	No se registran obras en el lugar
<b>Posición fisiográfica</b>	Colina	Lomaje
<b>Ubicación en el relieve</b>	Hondonada	Ladera
<b>Forma de la ladera</b>	Recta	Convexa
<b>Forma del contorno</b>	Convexa	Convexo
<b>Drenaje externo</b>	Moderado	Rápido
<b>Elevación (msnm)</b>	294	317
<b>Exposición</b>	Norte	Norte
<b>Pendiente</b>		
Grados (°)	6 – 9	6 – 9
Porcentaje (%)	0 – 15	0 – 15
Denominación	Inclinado	Inclinado
Clase de pendiente	Moderada	Moderada
<b>Estrato arbóreo</b>	Bosque abierto mixto con amplias superficies erosionadas. Es posible encontrar especies nativas como espinos y exóticas como pinos y eucaliptus. Las herbáceas son de tamaño pequeño (no más de 5 cm) y los arbustos se localizan en forma aislada.	Bosque abierto con piso de herbáceas de estación de pequeño tamaño (no superior a 5 cm). Se observan pinos en forma aislada, y en mayor número especies nativas como espinos (en forma aislada). Los arbustos no superan los 50 cm. no encontrándose en forma agrupada ni formando rodales
<b>Uso anterior</b>	Extracción de leña y ganadería	Extracción de leña y ganadería
<b>Uso actual</b>	Reforestación, apicultura y ganadería porcina	Sin uso establecido
<b>Capacidad de uso</b>	VI	VI

**Tabla 7.14. Caracterización de los puntos de muestreo de la microcuencas 3 y 4.** En la tabla se indican las características de 2 puntos de muestreo, los cuales, corresponden a la microcuenca 3 (punto 3.1) y microcuenca 4 (punto 4.1). Fuente. Elaboración propia.



### 7.2.1.2. Análisis de los componentes químicos del suelo

Los suelos de Alto Loica están formados por la meteorización de la Cordillera de la Costa, lo cual, ha dado origen a 4 series de suelos: Cauquenes (CQ), Estancilla (STL), Lingolingo (LGG), LO Vásquez (LVZ) (Ciren, 1996). Algunos de ellos son profundos sobretodo en las zonas bajas debido al arrastre de material en las temporadas de invierno, en cambio, los suelos son delgados en las cotas más altas. En este sector predomina la serie Lo Vásquez que se ha estructurado sobre roca granítica rica en cuarzo (Ciren, 1996). La génesis del suelo, en combinación con los procesos geomorfológicos y antrópicos ha derivado en que éste tenga una concentración específica de macro y micronutrientes.

Las concentraciones químicas de los elementos del suelo han variado debido a fenómenos antrópicos como el monocultivo, la reforestación con especies exóticas y la escorrentía superficial (afectando a los horizontes superiores) que se incrementó por los procesos erosivos debido a la deforestación, agricultura y ganadería intensiva. El riego generalmente juega un papel clave en estos procesos incrementando la concentración de sales minerales en el suelo debido a los compuestos que están disueltos en ella (siendo las sales cálcicas y de magnesio las más comunes), ya que, el agua de riego procede mayoritariamente de los ríos que nacen en las altas cumbres de la Cordillera de los Andes, los cuales –en un ancho de 200 Km– arrastran material que se redistribuyen en los diversos causes. Sin embargo, el agua de riego en Alto Loica procedía básicamente de pozos y de microembalses realizados por los lugareños. Posteriormente y con el abandono de las actividades agrícolas solo el agua de la temporada invernal abasteció los requerimientos de la vegetación del sector. La conjunción de estos elementos (más el aporte de la materia orgánica y la reforestación) han determinado concentraciones de elementos y compuestos en forma puntual. Para la determinación de estas últimas, el muestreo se efectuó en diversos puntos de las microcuencas y en lugares puntuales en los cuales se han implementado obras de restauración hidrológica – forestales y otros lugares como zonas erosionadas de la microcuenca 4.

Microcuenca	Sector	Punto
1	Zanja de infiltración con eucaliptos	1.1
2	Estación de aforo	2.1
	Zanja de infiltración con eucaliptos	2.2
	Zanja de infiltración con pinos	2.3
	Murete de saco con aroma	2.4
	Cárcava con quillay	2.5
3	Dique de poste con pinos	3.1
4	Cárcava sin obras	3.2

**Tabla 7.15. Puntos de muestreo para la determinación del análisis químico de los suelos de Alto Loica.** La especificación de los puntos de muestreo se describe en el punto anterior, en la tabla se muestran la microcuenca con la tipificación de los puntos y las características de la zona de muestreo. Fuente: Elaboración propia.

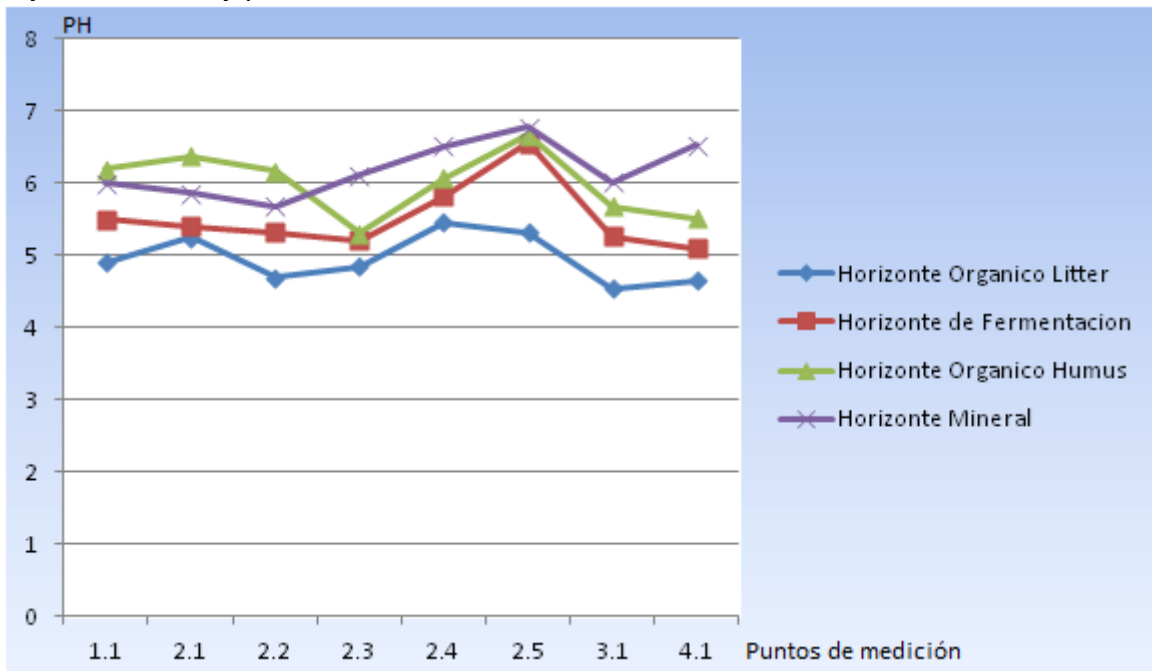
Microcuenca (MC)	Identificación Horizonte	CIC cmol+/Kg	Ph	C. E. mS/cm	M. O. %	N <sup>1</sup> ppm	N <sup>2</sup> %	P <sup>1</sup> ppm	K <sup>1</sup> ppm
<b>MC 1</b>									
Zanja de infiltración con eucaliptos	Orgánico litter	70.45	4.90	2.50	60.6570	56	0.956	105	1430
	De fermentación	90.35	5.50	1.32	62.8637	34	0.874	97	970
	Orgánico humus	50.38	6.20	1.11	32.8976	26	0.854	56	540
	Mineral	15.20	6.00	0.45	2.3451	5	0.065	5	75
<b>MC 2</b>									
Estación de aforo	Orgánico litter	123.2	5.25	5.33	52.7850	403	0.935	409	10230
	De fermentación	86.4	5.40	1.24	60.7347	35	0.789	309	6536
	Orgánico humus	28.5	6.38	0.85	5.86060	15	0.267	9	109
	Mineral	16.5	5.86	0.27	1.23140	10	0.066	8	38
Zanja de infiltración con eucaliptos	Orgánico litter	40.3	4.70*	2.00	57.2927	35	0.737	94	1806
	De fermentación	102.7	5.32*	1.24	55.0317	26	0.776	73	888
	Orgánico humus	74.3	6.19*	1.12	38.2900	22	0.629	44	559
	Mineral	13.3	5.68	0.30	2.02600	3	0.056	6	80
Zanja de infiltración con pinos	Orgánico litter	102.8	4.85*	0.55	84.2880	40	0.603	37	606
	De fermentación	134.7	5.21*	0.60	80.9890	31	1.003	48	683
	Orgánico humus	94.5	5.31*	0.70	55.4250	23	0.880	66	502
	Mineral	12.7	6.11	0.32	1.49300	15	0.046	4	58
Murete de saco con aroma	Orgánico litter	106.3	5.46*	1.61	80.1980	50	1.098	30	1318
	De fermentación	81.0	5.82*	1.51	53.4800	31	1.107	21	928
	Orgánico humus	58.7	6.07	1.30	28.6780	21	0.775	21	459
	Mineral	26.4	6.52	0.29	2.19800	4	0.076	4	75
Cárcava con quillay	Orgánico litter	91.7	5.32**	4.23	80.9520	89	0.812	395	5906
	De fermentación	86.0	6.55*	2.55	38.4090	38	0.663	108	1068
	Orgánico humus	77.7	6.67*	1.96	26.2280	34	0.552	52	531
	Horizonte mineral	14.6	6.78	0.25	1.38100	7	0.057	8	40
<b>MC 3</b>									
Dique de poste con pinos	Orgánico litter	93.0	4.54*	2.41	81.5630	45	0.724	128	1018
	De fermentación	99.6	5.27*	1.54	76.5190	40	0.877	103	1128
	Orgánico humus	52.7	5.68*	1.11	29.5030	36	0.482	58	613
	Mineral	8.5	6.01	0.48	2.79300	7	0.142	4	169
<b>MC 4</b>									
Cárcava sin obras	Orgánico litter	81.3	4.65	5.06	69.2780	62	0.541	94	3425
	De fermentación	70.2	5.10	3.18	54.7200	54	0.770	70	2345
	Orgánico humus	54.6	5.52	2.58	17.6580	30	0.592	35	470
	Horizonte mineral	18.3	6.53	0.63	2.81800	6	0.092	4	111

Tabla 7.16. Macronutrientes del suelo en las microcuencas de Alto Loica. (1): Disponible (2): Total

Microcuenca (MC)	Identificación Horizonte	Fe ppm	Zn ppm	Mn ppm	Cu ppm	Ca cmol/kg	C. Total (%)	Relación C/N	B ppm
<b>MC 1</b>									
Zanja de infiltración con eucaliptos	Orgánico litter	8.647	8.87	230.67	3.87	10.54	38.63	48.40	20.46
	De fermentación	42.574	14.98	314.87	6.14	15.72	32.76	35.21	12.45
	Orgánico humus	90.878	15.27	80.76	2.98	14.57	34.94	15.89	3.56
	Mineral	80.787	0.56	56.98	1.29	5.34	1.38	14.37	0.32
<b>MC 2</b>									
Estación de aforo	Orgánico litter	164.00	11.40	317.60	4.40	7.48	30.617	32.75	6.32
	De fermentación	215.80	40.35	415.60	3.89	7.50	22..56	27.98	2.98
	Orgánico humus	315.20	4.46	102.80	2.64	8.58	3.399	12.73	0.46
	Mineral	150.40	1.16	62.80	1.70	4.92	0.714	10.82	0.15
Zanja de infiltración con eucaliptos	Orgánico litter	5.100	5.85	33.48	1.55	11.42	33.232	45.09	23.70
	De fermentación	7.400	8.90	60.40	3.10	23.14	31.921	41.14	17.89
	Orgánico humus	42.00	5.44	42.64	2.64	24.36	22.210	35.31	8.30
	Mineral	39.98	0.28	51.60	1.08	3.57	1.175	26.98	0.33
Zanja de infiltración con pinos	Orgánico litter	14.80	11.80	469.60	2.00	6.00	48.991	81.08	0.67
	De fermentación	67.00	23.40	618.00	5.60	20.47	46.977	46.84	7.06
	Orgánico humus	121.50	18.90	429.60	6.40	17.84	32.149	36.53	4.0
	Mineral	26.34	0.22	47.60	1.16	5.32	0.866	18.83	0.23
Murete de saco con aroma	Orgánico litter	15.30	5.60	161.40	2.20	16.76	46.519	42.37	18.6
	De fermentación	16.20	4.60	150.80	2.50	20.50	31.021	28.02	5.70
	Orgánico humus	34.40	4.00	114.48	1.44	18.83	16.634	21.46	2.28
	Mineral	7.24	0.20	17.78	0.14	11.28	1.275	16.78	0.22
Cárcava con quillay	Orgánico litter	2.60	6.20	197.40	2.20	63.43	46.956	57.83	15.20
	De fermentación	16.50	4.20	179.40	1.50	33.97	22.279	33.60	3.91
	Orgánico humus	32.00	3.52	157.12	1.36	29.94	15.214	27.56	2.02
	Mineral	17.86	0.42	19.38	0.48	7.28	0.8008	14.05	0.20
<b>MC 3</b>									
Dique de poste con pinos	Orgánico litter	8.80	22.80	632.00	4.40	14.05	47.310	65.34	29.32
	De fermentación	23.40	20.10	326.60	3.90	20.82	44.385	50.61	15.13
	Orgánico humus	70.00	9.30	282.50	2.50	11.82	17.113	35.50	4.00
	Mineral	29.94	0.30	51.74	1.00	2.10	1.620	11.41	0.41
<b>MC 4</b>									
Cárcava sin obras	Orgánico litter	7.60	3.40	114.40	3.80	30.02	40.185	74.28	8.65
	De fermentación	13.30	4.40	139.20	2.10	16.94	31.740	41.22	5.80
	Orgánico humus	41.50	3.40	108.10	1.80	20.01	10.242	17.30	2.07
	Mineral	20.76	0.70	31.80	0.86	6.93	1.635	17.77	0.27

Tabla 7.17. Micronutrientes del suelo en las microcuencas de Alto Loica. \* = Relación suelo/agua 1:5 \*\* = Relación suelo/agua 1:10

Los análisis muestran que el pH fluctúa entre los 4.5 – 5.4 en el horizonte superficial y entre los 5.6 – 6.7 en el horizonte más profundo (mineral), por lo que son relativamente ácidos en la superficie y ligeramente básicos en los horizontes más internos. La oscilación del pH no es muy pronunciada lo que indica que el proceso de basicidad en las zonas bajas no está muy pronunciada ni avanzada.



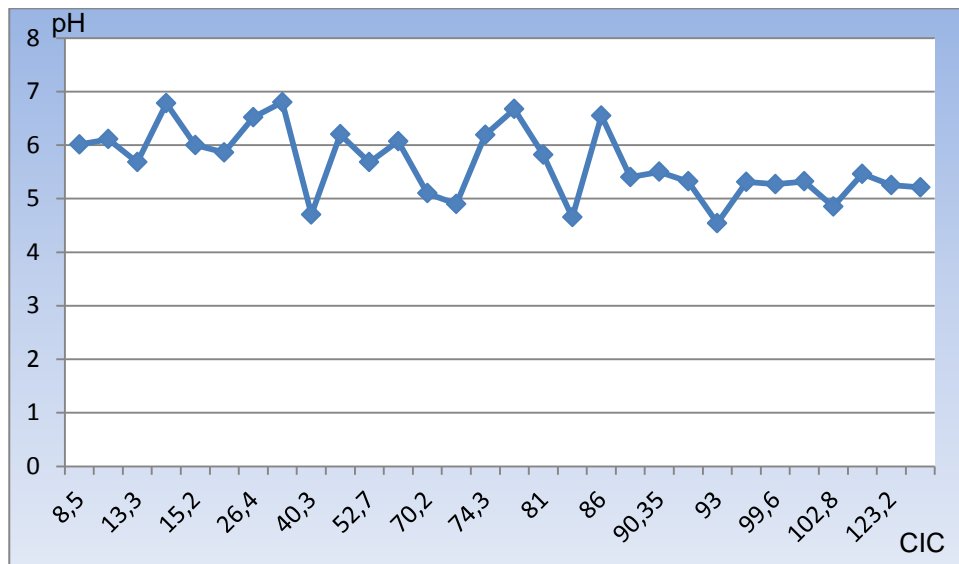
**Figura 7.36. Variación del pH en los distintos horizontes.** La fluctuación del pH es notoria en los diferentes horizontes del suelo de Alto Loica, aunque sin grandes variaciones, se encuentra un pH más alto en los horizontes superficiales y este comienza a bajar en los horizontes más profundos. Fuente: Elaboración propia.

En los horizontes superficiales hay materia orgánica en descomposición proveniente de restos vegetales, los cuales, al encontrarse en descomposición presentan un bajo pH debido a la formación de ácidos fúlvicos y la alta capacidad de intercambio catiónico. Dado que estos valores se aproximan a 7, es de esperar que contribuya positivamente a las propiedades físicas del suelo y con ello aumenten los procesos de reforestación de las microcuencas. El pH superficial del suelo se explica además por la presencia de materia orgánica de naturaleza ácida como por ejemplo restos de *pinus radiata* y *pinus pinea*. Además, la alta presencia de nitrógeno, contribuye a la adsorción de hidrogeniones lo que impide una disminución progresiva del pH.

En cambio, en los horizontes internos del suelo, la cantidad de materia orgánica disminuye más de un 90 %, lo que genera a su vez una disminución de los coloides y de micronutrientes, por lo que el pH se debe casi en su totalidad a los minerales originarios del suelo.

La alta compactación del suelo contribuye a su vez a una menor infiltración de agua y por lo tanto no hay una acidificación de suelo al no existir intercambio de los  $H^+$  del agua por  $Ca^{++}$  por lo que no se satura.

Otro elemento importante es que el pH está vinculado con la biodisponibilidad de micronutrientes, ya que, su concentración y disponibilidad para los vegetales están determinados por este. De la misma forma, el pH condiciona las especies iónicas y la movilidad de estos elementos, ya que, la migración o inmovilidad de ellos, depende del pH presente en el suelo.



**Figura 7.37. Relación entre la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y el pH.** La grafica indica una relación existente entre el pH y la CIC en los suelos de Alto Loica. Fuente: Elaboración propia.

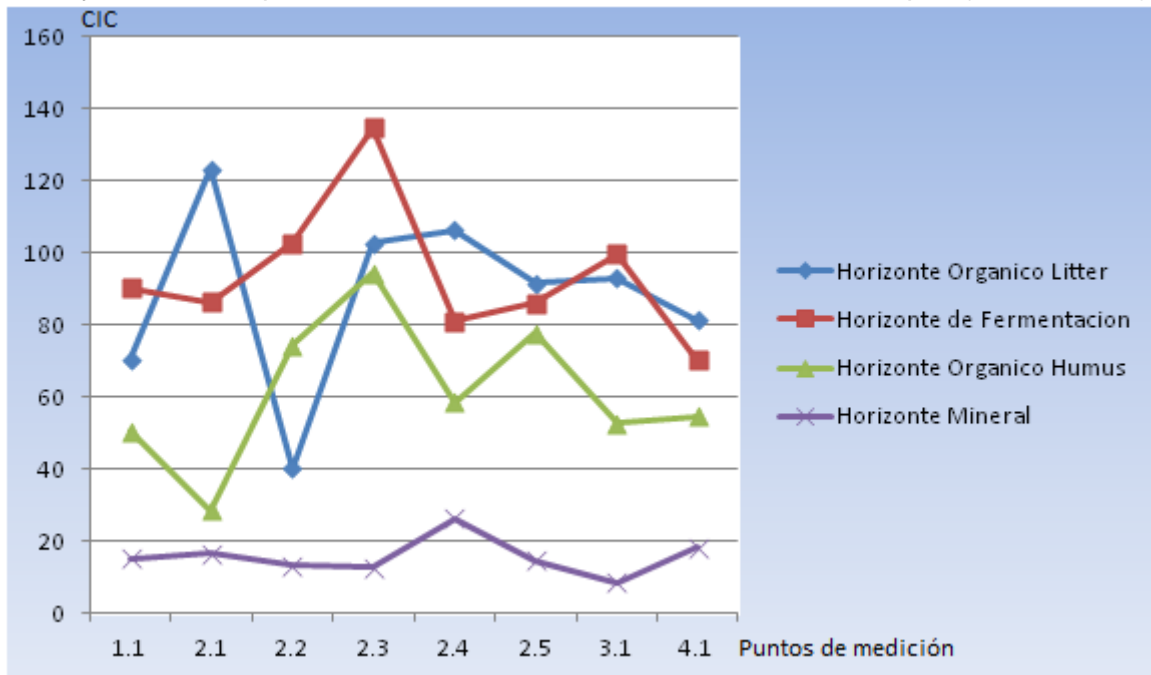
La biodisponibilidad del Mo y el Cl aumenta a medida que sube la basicidad del suelo debido a la liberación de estos elementos de los sitios de adsorción lo que da origen a sales solubles que contienen a estos elementos. La biodisponibilidad de estos elementos aumentan significativamente cuando el pH sube de 5.0 a 8.5 (Malavolta et al. 1997). Otros elementos como el Mn, Zn, Cu y Fe disminuyen su disponibilidad a medida que el pH aumenta, es decir, su biodisponibilidad aumenta a medida que disminuye la acidez del suelo. Un aumento del pH conlleva a la liberación de  $Fe^{+3}$  desde ciertas especies minerales lo que provoca una coloración ocre que es típica en algunos horizontes de los suelos de Alto Loica, aunque, la mayor concentración de este elemento está presente en los horizontes más profundos.

Otros elementos no tienen una biodisponibilidad en forma marcada como los mencionados anteriormente son el Al, K, Ca y B entre otros. Los 3 primeros se estabilizan a pH 5.5 estando a una disponibilidad constante hasta pH 8.5; el B en cambio, el único micronutriente que se encuentra en la solución del suelo como una especie sin carga en el rango de pH adecuado para la mayoría de los cultivos (Malavolta et al. 1997).

La disponibilidad de boro no se ve mayormente afectada por el pH del suelo, ya que todas las formas son solubles. Sin embargo, su concentración en la solución del suelo es ligeramente mayor en el rango de pH 5.5 – 7.5, donde predomina como  $H_3BO_3$  (Malavolta et al. 1997).

El pH interviene además en la variación de la CIC, la oscilación de este último está en relación con la oscilación del pH en los distintos horizontes. Esto además, se ve influido por la disposición de cationes en solución. En el caso de Alto Loica, la compacidad de los suelos y la baja retención de agua disminuye la disolución de los minerales por lo que a medida que aumenta la profundidad, cambia la. En los horizontes superficiales la concentración de  $K^+$  y  $Na^+$  son muy bajos y como existe poca acidificación de los suelos, no hay muchos iones  $H^+$

“En síntesis, a pH bajos los  $H^+$  están fuertemente retenidos en las superficies de las partículas, pero a pH altos los  $H^+$  de los grupos carboxílicos primero, y de los OH después, se disocian y los  $H^+$  pueden ser intercambiados por cationes, principalmente calcio y sodio. La capacidad de intercambio catiónico aumenta con el pH” (Cortés, 2007)



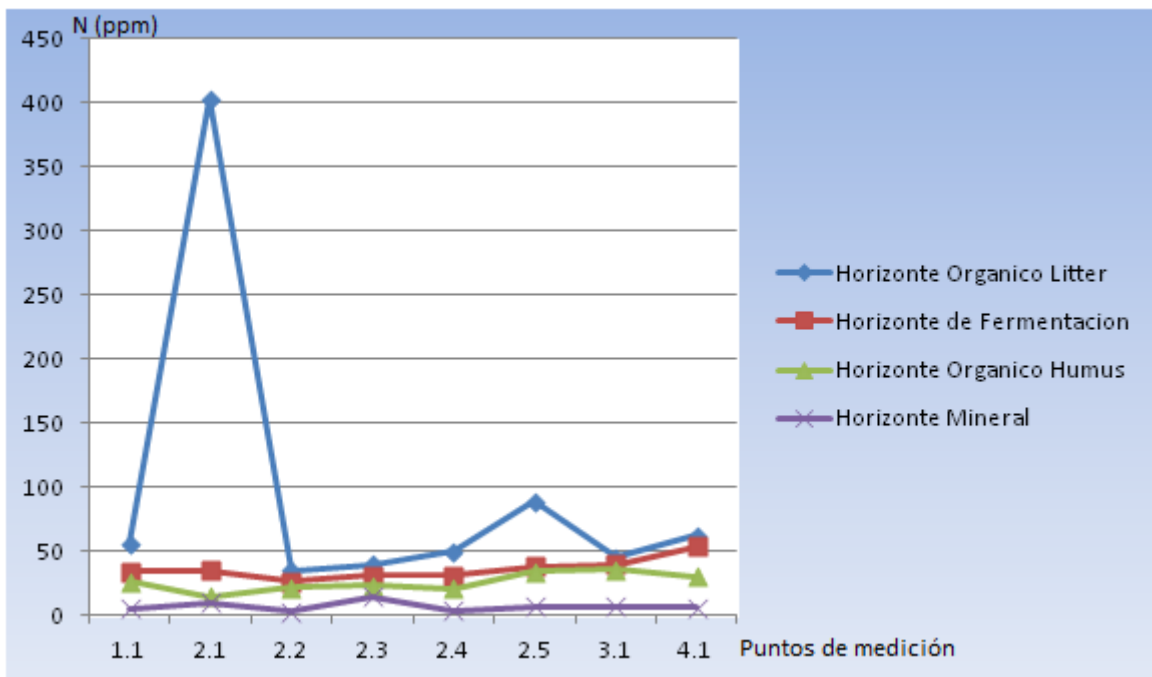
**Figura 7.38. Variación de la capacidad de intercambio catiónico en los distintos horizontes.** Existe una gran oscilación en la capacidad de intercambio catiónico (CIC) en un mismo pedón, lo cual, se condice con la fluctuación del pH. La menor CIC –así como una menor fluctuación– se nota en el horizonte mineral. Fuente: Elaboración propia.

En el horizonte superior, se tiene una C.I.C que fluctúa entre los 70 – 123  $cmol^+/Kg$ . Mientras que en horizontes más profundos oscila entre los 8 – 26  $cmol^+/Kg$ , este valor se relaciona con la baja cantidad de materia orgánica en los horizontes más profundos. Se infiere, por lo tanto, que el tipo de mineral arcilloso tiene poca capacidad de intercambio como la kaolinita.

Los elementos mas importantes para las plantas son el N, K y el P. Estos elementos no solo son necesarios para la nutrición y desarrollo de los vegetales, sino que además contribuyen a otorgar resistencia a las plantas contra las bajas temperaturas y por ende, dan mayor resistencia al frío (Español, et al, 2000). Esta característica es importante en las zonas de secano interior, ya que, este sector presenta estaciones muy marcadas con altas oscilaciones térmicas. Los mencionados elementos son importantes también debido

al hecho que determinan las características químicas del suelo y estas a su vez influyen en el genotipo de las especies vegetales (Gonzalez, et al, 2011)

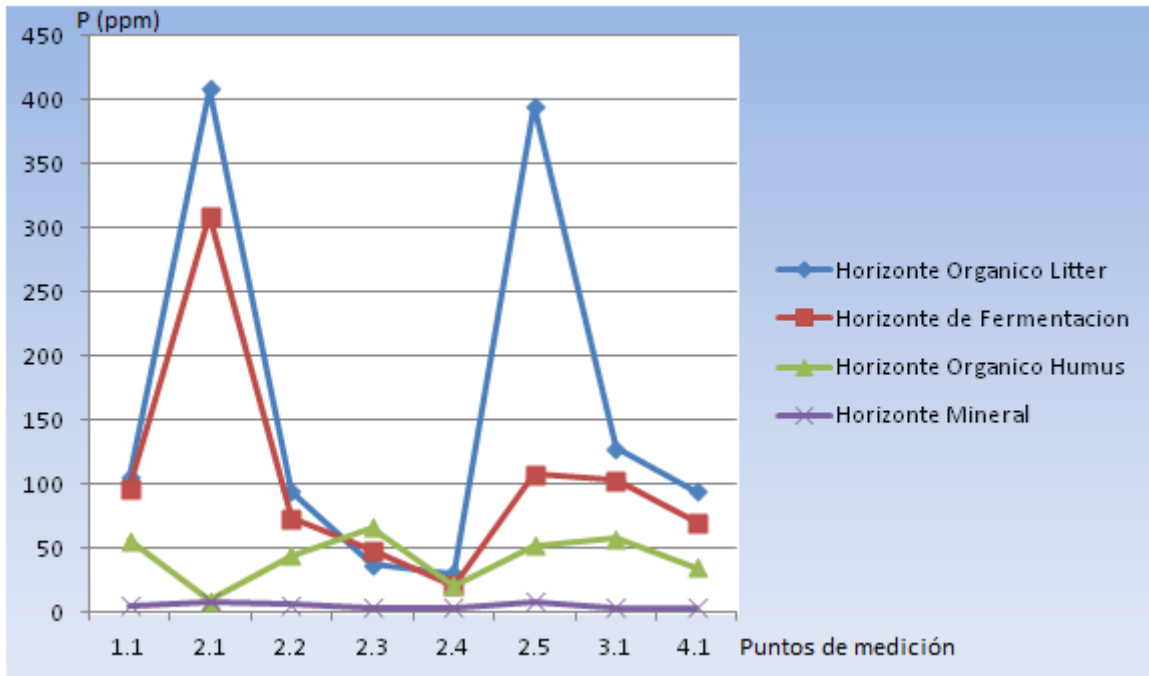
El calcio es importante para el crecimiento de las hojas en los vegetales por lo que los niveles de calcio en los suelos deben ser los óptimos para un eficiente desarrollo e la masa arbórea, sin embargo, los niveles de calcio en los horizontes superficiales son altos y en los horizontes inferiores son altos a muy bajos, esto –sumado al estrés hídrico de los suelos– impide una eficiente traslación del calcio en los vegetales (Oliva, et al, 1995). Lo anterior, sumado a una deficiencia de este elemento en el horizonte mineral, explica la muerte apical de las hojas y una reducción en el crecimiento de raíces de *Eucaliptus camaldulenses*,



**Figura 7.39. Variación del Nitrógeno en los distintos horizontes.** La fluctuación en la concentración del nitrógeno es relativamente estable en función de los horizontes, sin embargo se observan variaciones en un mismo pedón. Los niveles de nitrógeno aumentan en los horizontes superficiales, siendo ampliamente superior en el punto 2.2, lo cual, se justifica por estar en la zona abaja de la microcuenca y la abundante masa vegetal del lugar. Fuente: Elaboración propia.

En nitrógeno juega un papel preponderante en los ciclos ecosistémicos naturales. La falta de este elemento ocasiona reducción en el crecimiento foliar y clorosis uniforme de hojas (Español, 2000). Sin embargo, en los suelos de Alto Loica, la concentración de nitrógeno es alta en los primeros horizontes y baja en los horizontes mas profundos. Esto significa que el nitrogeno presenta una baja tasa de migracion a los horizontes mas profundos, debido –probablemente al pH– y a la alta compacidad de los suelos. A pesar que este elemento presenta un alta solubilidad en sus formas oxidadas, no migra como si lo hace en suelos normalmente porosos. La grafica indica que este elemento presenta sus niveles mas altos en los horizontes superficiales, esto en parte a la materia orgánica presente en la zona litter (lo cual se manifiesta en un peak máximo en el punto 2.2, en el cual, abunda la materia orgánica debido a la forestación del lugar), ya que , los ingresos de

este macronutriente al sistema es principalmente a través de la captura de  $N_2$  por parte de las bacterias *Rhizobium* y los procesos de nitrificación y amonificación de los compuestos presentes en la materia orgánica. Esto explica los bajos niveles de este elemento en los suelos, los cuales, están muy por debajo de los niveles adecuados..



**Figura 7.40. Variación del Fósforo en los distintos horizontes.** La variación de este elemento es notable en los horizontes del pedón, alcanzando altos niveles en el horizonte litter de la microcuenca 2, de la misma forma, el horizonte de fermentación posee altos niveles de este elemento en comparación a los horizontes más profundos. Fuente: elaboración propia.

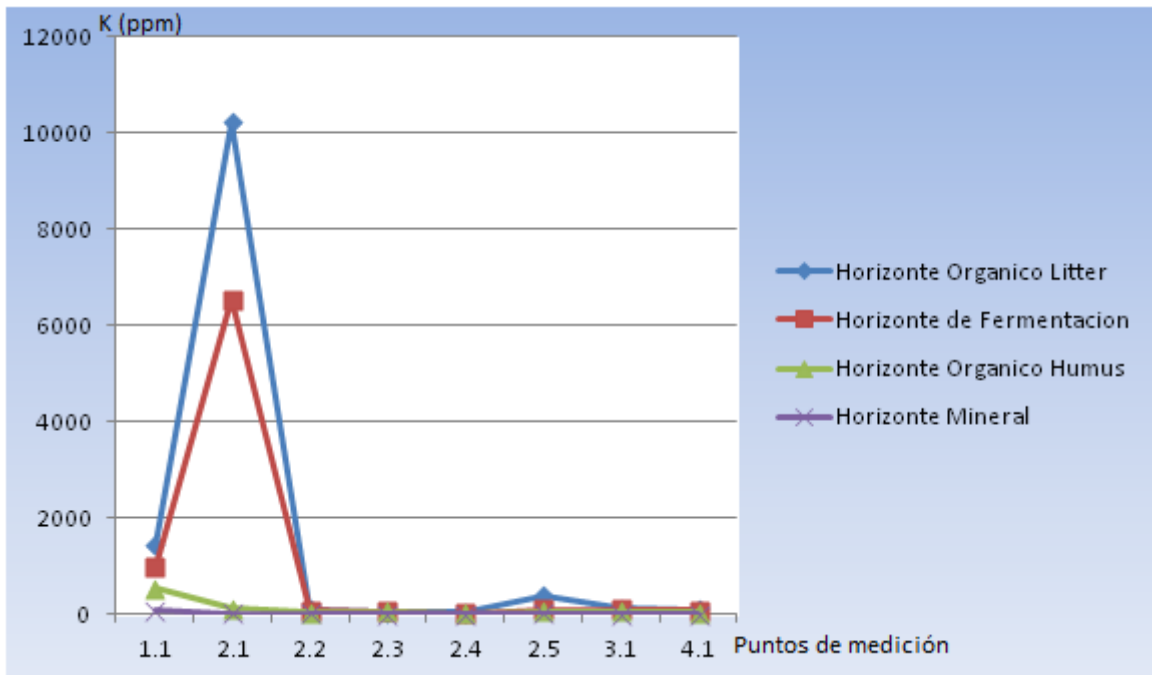
La fluctuación del fósforo en los suelos de Alto Loica es más marcada en comparación al nitrógeno y al potasio, donde los niveles son más regulares. En el horizonte orgánico litter de la microcuenca 2 se encuentran los niveles más altos de este elemento debido a la materia orgánica proveniente de la reforestación de especies vegetales.

Este elemento es importante para el crecimiento de los árboles en altura (Oliva, et al, 1995), por lo que la falta de este elemento se traduce en enanismo y poco desarrollo radicular, lo cual, se manifiesta en especies como los eucaliptus. Los bajos niveles de este elemento en los horizontes más profundos, evidencian la carencia del fosforo en el material primordial del suelo, ya que, al ser un elemento sedimentario, los altos niveles de este elemento en las zonas bajas de las cuencas indican que los ríos son los principales proveedores al arrastrar y solubilizar este elemento de las rocas fosfatadas de la Cordillera de los Andes.

Los suelos de Alto Loica, en cambio, están situados en la Cordillera de la Costa y no cuentan con irrigación de causas provenientes de las zonas altas de la cuenca El Yali, por lo que los niveles de fósforo provienen casi exclusivamente del material de origen y no por el aporte de aguas de la zonas altas de la cuenca, además, la formación de torrentes durante los eventos pluviométricos arrastran material a las zonas bajas de las microcuenca aumentando con ello los niveles de fósforo en el sector de Loica Bajo. Los



bajos niveles en los horizontes más profundos indican (al igual que en el caso del nitrógeno) la baja migración de este elemento debido a la compacidad del suelo a pesar de presentar formas solubles.



**Figura 7.41. Variación del Potasio en los distintos horizontes.** Este elemento alcanza su máxima concentración en la microcuenca 2, alcanzando altos niveles en el horizonte litter y en el horizonte de fermentación, aunque, los niveles son relativamente constantes en las otras microcuencas. Fuente: elaboración propia.

Existen bajos niveles de potasio en los suelos de Alto Loica y estos son relativamente constantes en los horizontes siendo el aporte de la materia orgánica la principal fuente de este elemento. Aunque se producen 2 peaks que elevan los niveles en el horizonte orgánico litter y en el horizonte de fermentación en el punto 2.1 de la microcuenca 2, esto no incide en los valores que se registran en los otros puntos de medición, ya que, al igual que el nitrógeno y el fósforo, las concentraciones de potasio disminuyen a medida que aumenta la profundidad del horizonte, siendo el material original muy pobre en este elemento. La deficiencia de este elemento es visible en ciertos árboles del sector, ya que, existe necrosis de punta y borde de hojas

Nutrientes	Media	Moda	Mediana	Varianza	Des. Est,
<b>Nitrógeno</b>					
Orgánico litter	97.5	–	53	15515.15	124.56
De fermentación	36.12	31	34.5	71.26	8.44
Orgánico humus	25.87	–	24.5	50.12	7.07
Mineral	7.12	7	6.5	14.69	3.83
<b>Potasio</b>					
Orgánico litter	3217.37	–	1618	10985652	3314.46
De fermentación	1818.25	–	1019	3891454	1972.67
Orgánico humus	472.87	–	516.5	24055.83	155.09
Mineral	80.75	75	75	1825.07	42.72
<b>Fosforo</b>					
Orgánico litter	161.5	94	99.5	23142.57	152.12
De fermentación	103.65	–	85	7747.41	88.01
Orgánico humus	42.62	–	48	386.83	19.66
Mineral	5.37	4	4.5	3.12	1.76

**Tabla 7.18. Análisis estadístico descriptivo de los nutrientes del suelo de Alto loica.** Para estos 3 elementos la media baja a medida que se desciende en los horizontes, esto implica que las concentraciones más altas están en los estratos superiores del suelo, Sin embargo, existe una mayor correlación o estandarización de las concentraciones en el estrato mineral. Fuente: Elaboración propia.

Las concentraciones presentan disparidad debido a que los elementos no están en la misma concentración en el suelo debido a las diferencias en la biodisponibilidad de cada uno de ellos y en los efectos que provocan en los vegetales, algunos se necesitan en bajas concentraciones y otros en concentraciones más altas. En los 3 nutrientes mostrados en la tabla se denota una disminución de la concentración a medida que aumenta la profundidad; el horizonte orgánico litter presenta las medias más altas en comparaciones con los otros horizontes.

Sin embargo, a pesar de presentar las concentraciones más altas en los primeros estratos del suelo, existe una mayor dispersión entre las concentraciones de los estratos litter y de fermentación. En cambio, en los horizontes más profundos la disparidad es menor lo cual indica que las concentraciones tienen la tendencia a ser más uniformes en el estrato mineral. Esta uniformidad es estadística y depende muchos factores, tales como la pendiente (a mayor pendiente mayor pérdida de suelo sobre todo en sectores con erosión muy severa), y la sedimentación de elementos coluviales (sobre todo en la microcuenca 2) entre otros. Aunque las concentraciones sean más uniformes y estén disponibles para los vegetales, la biodisponibilidad dependerá de otros factores como la, humedad y la compacidad del suelo, ya que, al disminuir el primero y aumentar el segundo, disminuye la absorción de nutrientes a nivel radicular.

Nutrientes	Media	Moda	Mediana	Varianza	Des. Est,
<b>Calcio</b>					
Orgánico litter	19.96	–	12.73	364.04	19.07
De fermentación	19.88	–	20.48	55.71	7.46
Orgánico humus	18.24	–	18.33	46.56	6.82
Mineral	5.84	–	5.33	7.62	2.76
<b>Fierro</b>					
Orgánico litter	28.35	–	8.72	3022.77	54.97
De fermentación	50.27	–	19.96	4852.24	69.65
Orgánico humus	93.43	–	56	9017.89	94.96
Mineral	46.66	–	28.14	2245.41	47.38
<b>Zinc</b>					
Orgánico litter	9.49	–	7.53	37.54	6.12
De fermentación	15.11	–	11.94	159.06	12.61
Orgánico humus	8.03	–	4.95	35.66	5.97
Mineral	0.48	–	0.36	0.10	0.32
<b>Manganeso</b>					
Orgánico litter	269.56	–	214.03	38844.7	197.09
De fermentación	275.60	–	247.13	32960.91	181.55
Orgánico humus	164.75	–	111.29	16515.43	128.51
Mineral	64.26	–	51.67	2949.19	54.30
<b>Cobre</b>					
Orgánico litter	3.04	4.4	3	1.40	1.18
De fermentación	3.59	–	3.49	2.67	1.63
Orgánico humus	2.72	2.64	2.57	2.57	1.60
Mineral	0.96	–	1.04	0.23	0.48
<b>Boro</b>					
Orgánico litter	15.36	–	16.9	91.93	9.58
De fermentación	8.86	–	6.43	30.77	5.54
Orgánico humus	3.33	4	2.92	5.47	2.33
Mineral	0.26	–	0.25	0.0069	0.08

**Tabla 7.19. Análisis estadístico descriptivo de los micronutrientes del suelo de Alto loica.** El análisis indica como para ciertos elementos la media es directamente proporcional a la profundidad del suelo y en algunos casos inversamente proporcionales. De la misma forma, la dispersión de los datos es mayor en los estratos superiores del suelo. Fuente. Elaboración propia.

Respecto de los micronutrientes, algunos son deficientes y otros abundantes debido al material granítico alterado (como el caso del Fe), aunque, existen niveles críticos de ciertos elementos para que el suelo pueda sostener con éxito a través de los años, vida vegetal.

Micronutriente	Nivel crítico (mg/cc)
Cobre	0,001
Zinc	0,001
Manganeso	0,005

**Tabla 7.20. Concentración mínima de micronutrientes.** La tabla indica los valores críticos de 3 micronutrientes necesarios para sostener vida vegetal en suelos forestales. La concentración de micronutrientes y macronutrientes debe tener valores mínimos para abastecer los elementos necesarios y máximos para evitar la toxicidad en las plantas. Fuente: Yamada, 2004.

En Boro es requerido para el óptimo crecimiento de la vegetación por lo que es un oligoelemento esencial, aunque, en cantidades excesivas se vuelve tóxico (Bañuelos, et al, 1999). Sin embargo, los niveles de este elemento es los suelos de Alto Loica es muy bajo sobretodo en el horizonte mineral. Esto último es perceptible en las hojas de *Eucaliptus globulus* y *Eucaliptus camaldulenses* donde las hojas amarillean o presentan motas o sequedad en los tejidos. Estos síntomas avanzan desde la punta a lo largo de los bordes y hacia el centro de la hoja entre los nervios (Bañuelos, et al, 1999). Esto último que es muy notorio en los eucaliptus, ya que, es uno de los arboles más representativos de las microcuencas por ser una de las especies más usadas para la reforestación debido a sus resistencia al estrés hídrico (Oliva, et al, 1995), además, el boro es un elemento esencial para el desarrollo de este árbol por lo que su carencia (o niveles muy por debajo del óptimo) afecta su desarrollo no alcanzando su desarrollo arbóreo reflejándose en una disminución en el diámetro del tronco y alturas muy por debajo de lo habitual. Esto último es visible en los eucaliptus de la microcuenca 2, los cuales, se secan aproximadamente a los 15 años.

Concentración (ppm)	Impacto en el suelo
< 1	No suplen suficiente cantidad de Boro para el crecimiento normal de plantas
1 – 5	Suplen concentraciones de Boro que permiten el normal crecimiento de plantas
> 5	Podrían suplementar concentraciones tóxicas de Boro

**Tabla 7.21. Efectos de los diferentes niveles de Boro en los suelos.** La concentración óptima de Boro en los suelos para el desarrollo de vida vegetal fluctúa alrededor de las 5 ppm, sin embargo, niveles inferiores a esta concentración no es suficiente o altera el desarrollo de los árboles. Niveles superiores implican consecuencias graves que conllevan a niveles que pueden ser tóxicos para las plantas. Fuente: Salazar, 2006.

El Boro al igual que otros elementos presenta diferente comportamiento según el pH al cual se encuentre: su adsorción aumenta a medida que el pH aumenta, por lo que debería esperarse una mayor adsorción de este elemento en los horizontes más profundos en los suelos de las microcuencas, en cambio, a pH menores a 7, la forma predominante es  $H_3BO_3$  (Goldberg, et al, 1993), por lo que esta especie debe ser la predominante en los horizontes superficiales del suelo especialmente en el horizonte orgánico litter y en el horizonte de fermentación donde el pH es más bajo.

Punto(*)	O(**)	E(***)	(O - E)	(O - E) <sup>2</sup>	(O - E) <sup>2</sup> /E
1.1	0,32	5	- 4,68	21,90	4,38
2.1	0,15	5	- 4,85	23,52	4,70
2.2	0,33	5	- 4,67	21,80	4,36
2.3	0,23	5	- 4,77	22,75	4,55
2.4	0,22	5	- 4,78	22,84	4,56
2.5	0,20	5	- 4,80	23,04	4,60
3.1	0,41	5	- 4,59	21,06	4,21
4.1	0,27	5	- 4,73	22,37	4,47
					Σ = 35,83

**Tabla 7.22. Prueba del  $X^2$  para la concentración de Boro.** Los valores fueron tomados del horizonte mineral de los puntos de muestreo. La prueba se efectuó con 7 grados de libertad considerando como esperado un valor de 5, ya que, este es el valor óptimo (en ppm) en los suelos para un eficaz desarrollo de los árboles especialmente de eucaliptus (Oliva, et al, 1995), los cuales, son altamente sensibles a la carencia o bajos niveles de este elemento. Fuente: Elaboración propia.

(\*): Muestreo efectuado en el horizonte mineral

(\*\*): Observado

(\*\*\*): Esperado

La prueba del  $X^2$  muestra que los niveles de Boro en el horizonte mineral están estadísticamente bastante alejados de lo requerido o esperado de la concentración óptima que necesitan [especialmente] los eucaliptus de las microcuencas. La probabilidad es bastante baja alcanzando un valor inferior al 0,1 %.

En el caso del Zn, las concentraciones más altas se encuentran en el horizonte de fermentación en los estratos superiores alcanzando un rango que fluctúa entre los 4,20 – 40 ppm, en cambio, las concentraciones más bajas están en el horizonte mineral con una fluctuación de 0,20 – 16 ppm.

La materia orgánica forma complejos estables con el Zn por lo que es posible encontrar acumulaciones de este elemento en presencia de materia orgánica, esto último, permite explicar los altos niveles de este elemento en los horizontes superficiales del suelo, no así, en los horizontes inferiores donde la materia orgánica alcanza niveles de hasta un 90 % más bajo en comparación a los horizontes superiores en Alto Loica.

El Zn es un elemento soluble en los suelos cuyo comportamiento está fuertemente influido por el pH: la adsorción de Zn baja a pH menor a 7, lo que implica que la adsorción de este elemento es menor en los horizontes superficiales del suelo y a pH más alto forma complejos orgánicos solubles, la cual debería ser la forma en la cual este elemento se encuentra en los horizontes más profundos del suelo.

Este elemento es importante para la vegetación forestal, ya que, participa en procesos metabólicos como la respiración y la síntesis de clorofila y proteínas (Fancelli, 2006), por ello, la carencia o bajos niveles de este elemento afecta fuertemente el metabolismo vegetal. Sin embargo, en los suelos de Alto Loica los valores superan en muchos estratos las 5 ppm, lo cual, se considera aceptable debido a que el rango óptimo para el crecimiento y desarrollo vegetal es de 0,5 – 1 ppm (Scheid, 2006).

El Mn es el elemento presente en mayor concentración en los suelos de Alto Loica, fluctuando entre los 469 – 632 ppm en los horizontes superficiales y los 17 – 62 ppm en el horizonte mineral. Se presenta como  $Mn^{2+}$  en la solución del suelo y en el complejo de cambio por lo que esta debiera ser la forma dominante en los estratos superiores del suelo debido a la presencia de coloides que aumentan los sitios de intercambio. Además es posible encontrarlo como  $MnO_2$  (Ferraris, et al., 2010).

Nutriente	Nutrientes	Media	Des. Est,	[z]*	P(z)**
<b>Nitrógeno</b>	Orgánico litter	97.5	124.56	10	0,220
	De fermentación	36.12	8.44	10	0,001
	Orgánico humus	25.87	7.07	10	0,011
	Mineral	7.12	3.83	10	0,192
<b>Potasio</b>	Orgánico litter	3217.37	3314.46	25	0,142
	De fermentación	1818.25	1972.67	25	0,166
	Orgánico humus	472.87	155.09	25	0,001
	Mineral	80.75	42.72	25	0,853
<b>Fosforo</b>	Orgánico litter	161.5	152.12	10	0,142
	De fermentación	103.65	88.01	10	0,121
	Orgánico humus	42.62	19.66	10	0,047
	Mineral	5.37	1.76	10	0,996

**Tabla 7.23. Análisis estadístico sobre las cantidades mínimas necesarias de cada nutriente para los suelos forestales.** La tabla indica el análisis en base a la “distribución normal” ( $p < 0,05$ ) de encontrar al azar la concentración mínima de cada nutriente en los suelos de Alto Loica. Fuente: Elaboración propia.

(\*) Concentración mínima (z) necesaria para suelos forestales descrita por Zamuner y Culot (1998) y Salazar y colaboradores (2003). Los valores cambian con la profundidad, por lo que solo se efectuó una estimación mínima necesaria para los requerimientos de los vegetales.

(\*\*) Probabilidad (P) de encontrar la concentración mínima necesaria de cada elemento en los suelos de Alto Loica.

## **7.2.2. Análisis físico**

El análisis físico comprendió básicamente dos aspectos: el análisis de la profundidad del suelo en las microcuencas y el análisis de la estructura y composición de sus horizontes.

Respecto de lo primero, la creación de los transeptos (en sentido N – S y E – O) dio origen a 15 puntos ( $P_{x,y}$ ) de medición en la microcuenca 1, 18 en la microcuenca 2, 33 en la microcuenca 3 y 36 en la microcuenca 4. Este análisis determinó diversas fluctuaciones en la profundidad de los suelos en las microcuencas debido principalmente a las características del terreno. En primer lugar la zona se encuentra en la Cordillera de la Costa lo que da origen a una gran variación topográfica y en segundo lugar el sector se localiza en una zona con altitudes que fluctúan entre los 250 y 500 msnm con quebradas y pendientes, siendo un sector muy accidentado que carece de planicies. Los suelos son relativamente delgados, aunque, con variaciones en las zonas altas y medias de las microcuencas.

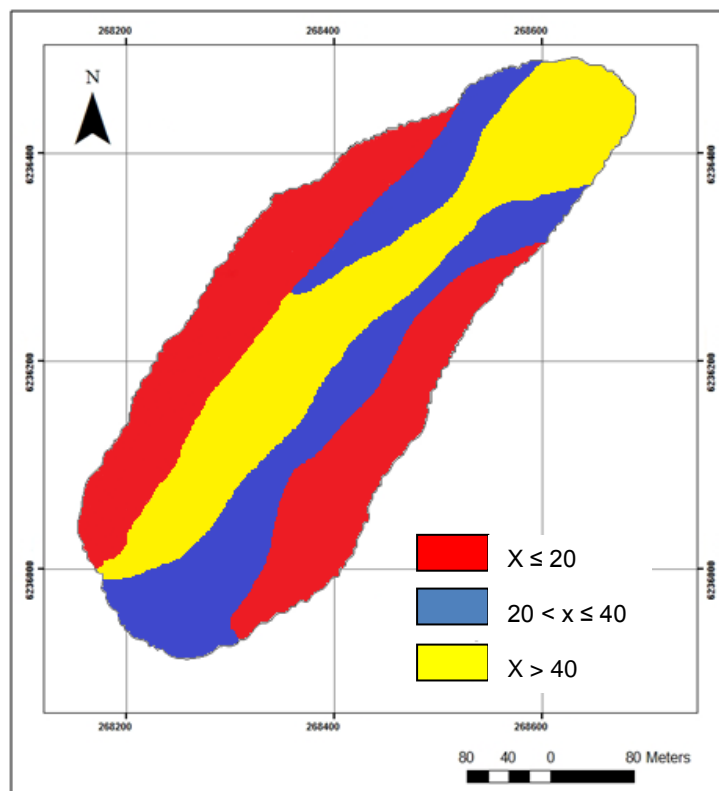
En segundo lugar, la creación de calicatas siguió la lógica de cotas altas, medias y bajas, esto significa que se realizaron calicatas en las zonas altas de las microcuencas, en las zonas medias y en las zonas bajas para establecer en forma más precisa la composición de los horizontes del suelo debido fundamentalmente a las variaciones que experimentan los horizontes en cuanto a su profundidad a distintas cotas y diferente topografía. Se realizó una calicata en la cota más alta de cada microcuenca para determinar la estructura de los horizontes en zonas más expuesta a la erosión hídrica y a la pérdida de suelo por arrastre de material sobretodo en las temporadas invernales, además, de los procesos que conllevan cambios en la estructura del suelo propio de los cambios de larga data. Las zonas medias generalmente pierden material si es que no están protegidas por una capa vegetal que sustente la estructura del suelo; en estas zonas, las pendientes (sobre todo si son muy pronunciadas) se caracterizan por perder mucho material por arrastre debido a la escorrentía superficial; es por ello que el suelo pierde sus horizontes superficiales en la medida que aumenta la pendiente y en mayor medida si estas zonas están desprovistas de capa vegetal, por ejemplo, en la microcuencas de Alto Loica el horizonte "A" es escaso en las zonas medias y en algunos lugares prácticamente inexistente. En cambio, en las zonas bajas, los horizontes son de mayor grosor y el horizonte mineral está a una profundidad mayor debido al material depositado de las cotas más altas.

El análisis físico basado en estos dos aspectos (determinación de la profundidad y análisis de horizontes) permitió cuantificar características como textura, profundidad de cada horizonte, compacidad del terreno (entre otros), los cuales explican la estructuración que tienen estos suelos de tipo forestal y que han sido ampliamente explotados lo que los ha transformado en suelos tipo VI (a VII en algunos casos) con enormes deficiencias y carencias para la generación de bienes y servicios.

### **7.2.2.1. Análisis de suelos por transeptos**

#### *Microcuencas 1*

La creación y cruce de transeptos en la microcuenca 1, originó 15 puntos en los cuales se efectuó la medición de la profundidad. Con el fin de precisar más los resultados, éstos abarcan tanto las zonas altas, medias y bajas de las microcuencas.



**Figura 7.42. Mapa de profundidad de suelos de la microcuenca 1.** Siendo “x” la profundidad del suelo (se segmenta en rangos de 20 centímetros) y las cifras expresadas en centímetros; la figura indica la profundidad del suelo en la microcuenca 1. En las zonas superiores de la microcuenca la profundidad del suelo es menor que en las zonas bajas. Esto –entre otras cosas– por la topografía de pendientes y por el arrastre de material debido a la escorrentía superficial. Fuente: Elaboración propia.

La disparidad en las profundidades obedece a múltiples razones. A pesar de que la distancia entre los puntos de medición no es tan amplia (solo de 100 metros entre un punto de medición y otro), el suelo es un continuo cuyas características cambian dependiendo de la topografía<sup>101</sup>, efectos antrópicos, y las características propias de su formación original. Geográficamente hablando, las microcuencas se localizan en la cordillera de la costa, por lo que la presencia de quebradas, laderas y pendientes es muy común en esta zona, además los efectos antrópicos han contribuido a la pérdida de suelo en las zonas altas originando una alta compacidad del mismo. Esto último, ha dado origen a que distintas profundidades, cuyos valores se estandarizan en determinados puntos originando que las mayores profundidades estén en las zonas bajas y las menores profundidades en las zonas medias y altas, lo cual es constante en todo el sector.

Según la clasificación de Schlatter y colaboradores (2003), los suelos de la microcuenca 1 son “muy delgados”, “delgados” y “moderadamente profundos”. La primera denominación se encuentra en las zonas altas de la microcuenca, aunque, por topografía en este sector abundan las quebradas y pendientes lo que justifica las profundidades encontradas; en

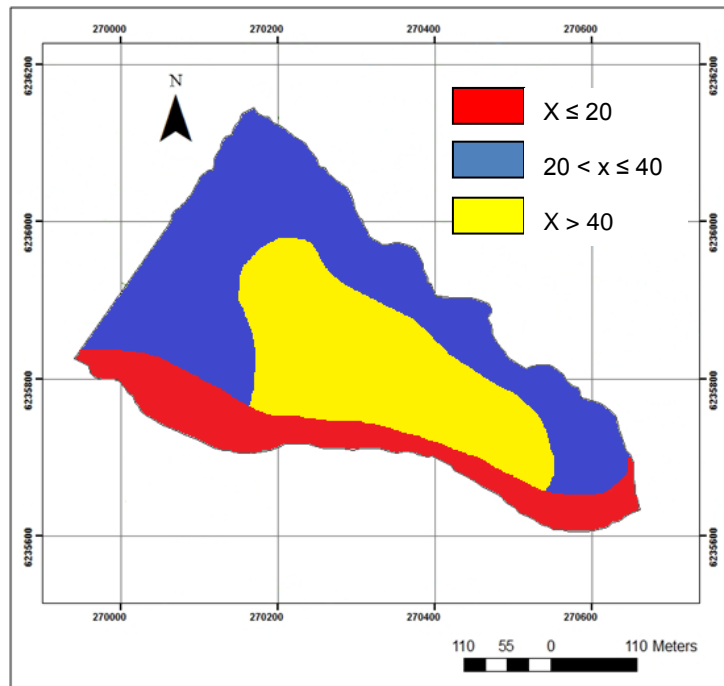
<sup>101</sup> Respecto de este punto vale considerar además el clima, ya que, los efectos climáticos en una cuenca son diferentes dependiendo de la topografía. Por ejemplo, el impacto de la gota de lluvia será mayor en una zona descubierta de vegetación y la escorrentía superficial tendrá distintos efectos tanto en la zona baja de la cuenca como en una ladera muy pronunciada, a pesar que la cantidad de agua caída sea la misma.



las zonas bajas, el suelo se cataloga como moderadamente profundo, ya que, su profundidad sobrepasa los 40 centímetros, debido principalmente a la topografía y al material arrastrado por la escorrentía superficial en las temporadas invernales. Además, la pérdida del horizonte superficial debido a la erosión severa a muy severa que afecta a ciertos sectores de este lugar ha contribuido a disminuir la profundidad del suelo.

### Microcuenca 2

La figura indica la estructura de los transectos en la microcuenca 1. Los puntos de unión de los transectos verticales y horizontales dan el punto en los cuales se efectuaron las mediciones de profundidad. Para un análisis más acabado, los transectos se hicieron cada 100 metros, formando la cuadrícula que se observa en la figura superior.



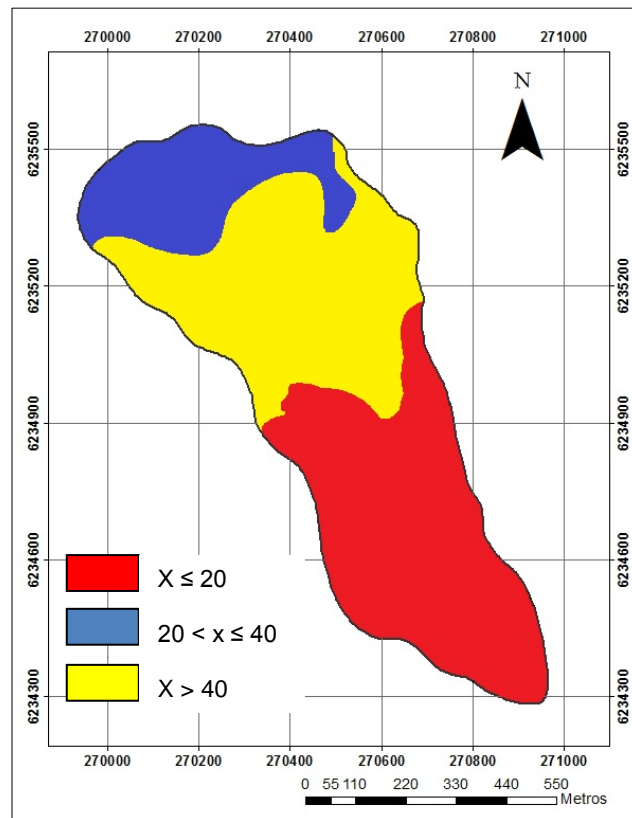
**Figura 7.43. Mapa de profundidad de suelos de la microcuenca 2.** Siendo “x” la profundidad del suelo (se segmenta en rangos de 20 centímetros) y las cifras expresadas en centímetros; la figura indica la profundidad del suelo en la microcuenca 2. En la zona sur el suelo alcanza la categorización de “muy delgado” debido a la presencia de caminos en ese lugar, sin embargo, en las zonas bajas al “pie de ladera” el suelo es “moderadamente profundo” por el material arrastrado de las zonas superiores donde el suelo es delgado (la profundidad no supera los 40 cm). Fuente: Elaboración propia.

La cuadrícula de transectos dio origen a 18 puntos de medición abarcando estos todos los sectores de la microcuenca, tanto las zonas altas como las zonas bajas. Los puntos fueron georreferenciados, dándose además una característica del entorno del lugar de la medición. Esta caracterización básicamente correspondió a zona de la microcuenca, presencia o no de herbáceas y/o vegetación arbórea, y tipo de erosión. En las zonas de ladera, la profundidad del suelo no supera los 40 cm de profundidad, principalmente por las pendientes que caracterizan a esta microcuenca, aunque, en las zonas de reforestación y donde la erosión no ha alcanzado niveles muy severos, la profundidad es levemente mayor. En las zonas bajas, el suelo es más profundo debido al arrastre de

material de las zonas altas y a la presencia de vegetación arbórea y arbustiva. En la zona sur, en cambio (indicado con rojo en la figura), el suelo es “muy delgado” debido al camino que se construyó en el sector socavando y compactando los primeros horizontes del suelo y porque la zona está rodeada de zonas con baja pendiente y no muy sometidas a la acción de la escorrentía superficial.

### Microcuenca 3

La topografía de la microcuenca 3 es distinta a la microcuenca 1 y 2. Aquí abundan las quebradas al igual que las disposiciones de los cauces. Existe vegetación arbórea pero concentrada solo en ciertos lugares, mientras que en otros la erosión laminar alcanza niveles de muy severa generando cárcavas de gran magnitud, lo cual, dio lugar a que la mayor cantidad de dispositivos de restauración ambiental instalados en esta microcuenca tuvieran por objeto controlar las cárcavas.



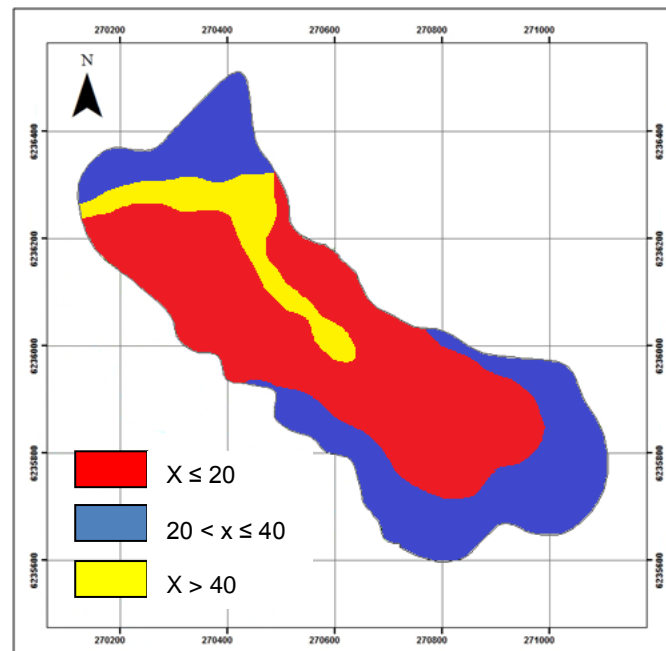
**Figura 7.44. Mapa de profundidad de suelos de la microcuenca 3.** Siendo “x” la profundidad del suelo y las cifras expresadas en cm; la figura indica la profundidad del suelo en la microcuenca 3. La microcuenca presenta una gran extensión en la cual, el suelo no supera los 20 cm de profundidad, siendo en su parte más baja donde se localiza en suelo de mayor profundidad. Fuente: Elaboración propia.

Aisladamente se visualizan pinos y espinos, pero la flora nativa es escasa (solo algunos representantes como boldo y peumos) y la que existe es producto de la restauración. La mayor cantidad de árboles se localizan en las cercanías del cauce principal por escurrimiento constante de agua (en proporciones mínimas). A diferencias de las microcuencas anteriores, la microcuenca 3 presenta un mayor grado de erosión,

encontrándose la catalogación de “muy severa” en distintos lugares de ella. En la figura, se indica con rojo, el sector donde el suelo no supera los 20 cm de profundidad. En esta zona predominan las quebradas y las pendientes con un alto grado de erosión; y, a pesar de haber en algunos casos vegetación arbórea con especies como pinos, eucaliptus y aromos, el suelo no presenta una capa vegetal que lo proteja contra la erosión hídrica, proceso que se acentúa en las temporadas invernales. Todo el material se deposita en la zona baja de la microcuenca donde se localiza en suelo más profundo. En las zonas altas, hay un mayor grado de compactación debido a los trabajos efectuados por los lugareños, como por ejemplo, construcción de caminos y asentamiento de ganado (cabe recordar que de las 3 microcuencas, esta es la única habitada), lo cual, ha contribuido a aumentar la erosión en toda la microcuenca.

#### Microcuenca 4

De todas las microcuencas de trabajo, la número 4 es la de mayor superficie abarcando aproximadamente una extensión de 0,35 Km<sup>2</sup> con un perímetro de 3,03 Km, por ello, la intersección de los transeptos dio origen a 36 puntos de medición; siendo la cuenca con más puntos a medir.



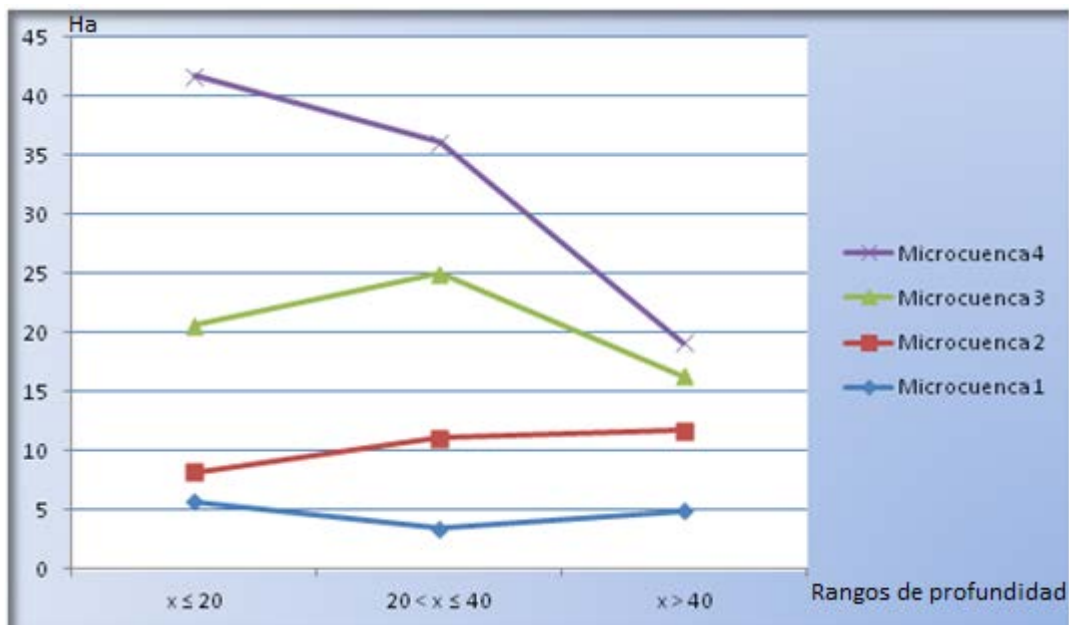
**Figura 7.45. Mapa de profundidad de suelos de la microcuenca 4.** Siendo “x” la profundidad del suelo (se segmenta en rangos de 20 centímetros) y las cifras expresadas en centímetros; la figura indica la profundidad del suelo en la microcuenca 4. Esta microcuenca es la de mayor superficie y por ser la cuenca control no se efectuó ningún tratamiento lo que explica la fuerte erosión. Solo una baja extensión de suelo supera los 40 cm y una alta proporción es menor a 20 cm, lo que explica en parte el grado de deterioro de esta microcuenca. Fuente: Elaboración propia.

Como en esta microcuenca no se efectuó ningún tratamiento de restauración (para dejarla como microcuenca control) los efectos de la deforestación y la erosión son evidentes. Prácticamente no se observan plantaciones o líneas de árboles de gran envergadura. Solo la presencia de espinos de baja estatura, los cuales, no superan los 2 metros de

altura son los ejemplares más recurrentes en esta microcuencia. El suelo está prácticamente desnudo y solo herbáceas que no superan los 4 cm son visibles únicamente en la temporada invernal para desaparecer en primavera. El horizonte "A" es casi inexistente, el suelo está latamente compactado y solo en la zona baja de la microcuencia el suelo supera levemente los 40 cm de profundidad; no así, en las otras microcuencias.

Los sectores altos de la microcuencia tienen una baja pendiente por lo que la escorrentía superficial es menos afectada por este factor, sin embargo, es alta debido a la deforestación, la baja cobertura vegetal y la alta compactación del suelo lo que la facilita y por ende, aumenta los procesos erosivos. Los sectores en que el suelo supera los 40 cm de profundidad tienen una baja superficie (en comparación a las otras microcuencias) y se localizan en la zona baja de la microcuencia en sectores aledaños al cauce principal.

A esta zona durante años, se ha producido la deposición del material arrastrado desde las zonas superiores de la microcuencia por escorrentía superficial. Las zonas de pendiente (que son mayoritarias en esta microcuencia) tienen suelos poco profundos y susceptibles de la erosión hídrica, principalmente por la pendiente y la baja o casi nula cobertura vegetal.



**Grafico 7.46. Superficie en hectáreas en función de la profundidad de suelos por estrato.** Siendo "x" la profundidad del suelo y los valores "x" [que acompañan a este parámetro] medidos en centímetros. Cada estrato de medición tiene 20 cm, El grafico denota básicamente la superficie (en hectáreas) que ocupa cada segmento de profundidad en las microcuencias. Fuente: Elaboración propia.

PARAMETROS	MICROCUENCAS			
	1	2	3	4
<b>Moda</b>	20	30	25	25
<b>Mediana</b>	30	30	28	25
<b>Promedio aritmético</b>	33,33	29,22	32,03	25,44
<b>Media geométrica</b>	29,17	28,40	29,35	23,41
<b>Varianza</b>	273,80	48,65	179,78	109,39
<b>Desviación estándar</b>	16,54	6,97	13,40	10,45

**Tabla 7.24. Valores para medidas de tendencia central de la profundidad de suelos por microcuena en Alto Loica.** La profundidad del suelo presenta valores similares en cuanto a ciertos indicadores. Los valores más lejanos implican diferencias en las profundidades atribuibles a topografía y fenómenos de erosión y sedimentación. Fuente: Elaboración propia.

#### 7.2.2.2. Análisis de calicatas

El suelo no solo es el resultado de los efectos físicos, sino además, de fenómenos químicos y biológicos que generan la meteorización de la roca madre hasta generar un producto que al cabo de millones de años adquiere características específicas. Estas, están determinadas no solo por una serie de procesos que durante milenios intervienen en él, sino, por las características propias del entorno en las cuales el suelo se ha formado y que fluctúan de un lugar a otro, por ejemplo, material originario, clima, relieve y microorganismos (Cortés, 2007)

En el caso de Alto loica, los suelos son básicamente graníticos (como gran parte de los suelos de la zona central de Chile) y de características arcillosas. Predominan los sitios ondulados a quebrados con pendientes “pronunciadas” a “muy pronunciadas”. Los horizontes son poco profundos con una baja presencia de microrraíces y con un bajo contenido de humedad.

Para el análisis de los suelos se consideró un análisis del entorno, lo cual resultó vital para complementar la información sobre las características edáficas. Para esto, se aplicaron los indicadores en los sitios donde se efectuaron las calicatas siendo en muchos casos similares en ciertos aspectos (posición fisiográfica, tipo de suelo y forma del terreno) y difiriendo en otros (como pendiente, exposición y altitud).

Las calicatas se construyeron en las zonas altas, medias y bajas (como se indicó anteriormente) demostrando aspectos en común y difiriendo en otros. En Alto Loica los suelos varían tanto en profundidad de los horizontes como en la textura (en ciertas calicatas, esta varía con la profundidad), aunque las variaciones en este último aspecto no son tan pronunciadas.

### 7.2.2.2.1. Microcuenca 1

#### a) Calicata 1.1

PARAMETROS	CÁRACTERÍSTICAS
<b>Localización (UTM)</b>	0268490 / 6236420
<b>Forma de terreno</b>	Terreno intermedio. Ondulado a quebrado
<b>Obra presente</b>	No se visualizan obras en el sector
<b>Posición fisiográfica</b>	Lomaje
<b>Ubicación en el relieve</b>	Ladera
<b>Forma de la ladera</b>	Cóncava
<b>Forma del contorno</b>	–
<b>Elevación (msnm)</b>	280
<b>Exposición</b>	Este
<b>Pendiente</b>	
Grados (°)	30
Porcentaje (%)	45
Denominación	Inclinación muy pronunciada
Clase de pendiente	Pronunciada
<b>Estrato arbóreo</b>	Formación arbórea conformada por eucaliptus y pinos
<b>Uso anterior</b>	Agricultura y ganadería
<b>Uso actual</b>	Sin uso establecido
<b>Capacidad de uso</b>	VI

**Tabla 7.25. Características topográficas del sitio de localización de la calicata 1.1.** El sector donde se localiza la calicata tiene características topográficas distintivas debido a la conformación del terreno y los efectos antrópicos generados en la microcuenca. Fuente: Elaboración propia.

Antes de la intervención –de restauración– la microcuenca 1 fue utilizada por años para actividades de agricultura (principalmente de trigo) y ganadería por los lugareños del sector. La tala efectuada en las zonas altas (donde se localiza la calicata mostrada en la tabla anterior), sumado a la clase dependiente, hizo que la escorrentía superficial erosionara el suelo y eliminara casi en forma absoluta el horizonte superficial.

Los pinos y eucaliptus que se observan en este sector corresponden en gran parte a vegetación implementada durante el proceso de restauración por lo que la vegetación nativa en las zonas altas de la microcuenca es prácticamente inexistente. Esto último ha generado que hasta la fecha ha sido imposible restituir las condiciones bioclimáticas existentes en el lugar antes de la intervención humana, ya que, la homeostasis ambiental es directamente proporcional (al menos el zona central de Chile) a la presencia de vegetación nativa.

PARAMETROS	HORIZONTES		
	A	B	C
<b>Profundidad (cm)</b>	0 – 10	10 – 50	> 50
<b>Textura</b>	Franco arenoso	Franco arenoso	Franco arenoso
<b>Presencia de raíces</b>			
Densidad (1 dm <sup>3</sup> )	Fuerte	Mediana	Leve
Tamaño	Muy fina	Fina	Fina
<b>Estructura</b>	Granular	Subpoliédrica	Masiva
<b>Consistencia</b>			
Seco	Duro	Muy duro	Extremadamente duro
Húmedo	Friable	Muy firme	Muy firme
<b>Pedregocidad (%)</b>	2	10	15
<b>Color</b>			
Seco	10YR 4/4	7,5YR 4/4	10YR 5,5/4
Húmedo	10YR 3/4	10YR 4/4	10YR 5/6
<b>Humedad</b>	Árido	Seco	Seco
<b>Densidad (gr/cc)</b>			
Aparente	1,36	1,40	2,00
Real	2,15	2,22	3,17

Tabla 7.26. Caracterización de los horizontes en la calicata 1.1. Fuente: Elaboración propia

PARÁMETROS	CARACTERÍSTICAS
<b>Limites de los horizontes</b>	
Forma	A – B Irregular B – C Irregular
Nitidez	A – B Claro B – C Claro
<b>Material de origen</b>	Granito intemperizado
<b>Grado de erosión</b>	Severa
<b>Profundidad del suelo</b>	
Fisiológica	50
Efectiva	42,50
<b>Factores limitantes</b>	Profundidad, drenaje interno, erodabilidad

Tabla 7.27. Aspectos generales de la calicata 1.1. Fuente: Elaboración propia

b) *Calicata 1.2*

PARAMETROS	CARACTERISTICAS
<b>Localización (UTM)</b>	0268500 / 6236380
<b>Forma de terreno</b>	Ondulado a quebrado
<b>Obra presente</b>	Zanjas de infiltración
<b>Posición fisiográfica</b>	Lomajes
<b>Ubicación en el relieve</b>	Ladera
<b>Forma de la ladera</b>	Convexa
<b>Forma del contorno</b>	–
<b>Elevación (msnm)</b>	250
<b>Exposición</b>	Este
<b>Pendiente</b>	
Grados (°)	30
Porcentaje (%)	60
Denominación	Escarpado
Clase de pendiente	Muy pronunciada
<b>Estrato arbóreo</b>	Formación arbórea conformada por eucaliptus y pinos
<b>Uso anterior</b>	Agricultura y ganadería
<b>Uso actual</b>	Sin uso establecido
<b>Capacidad de uso</b>	VI

**Tabla 7.28. Características topográficas del sitio de localización de la calicata 1.2.** Sector ubicado en la zona media de la microcuenca en una zona con amplia plantación de pinos y eucaliptus. Fuente: Elaboración propia.

Este lugar (localizado en un sector de menor altitud en la zona media de la microcuenca) presenta una pendiente más pronunciada y un grado de erosión mayor en comparación a las zonas altas de la microcuenca, ya que, a pesar de existir una conformación arbórea consistente mayoritariamente por eucaliptus no existe una formación herbácea capaz de contener la escorrentía en superficial. Sin embargo, en este lugar se implementaron zanjas de infiltración que captan aguas lluvias y evitan que el sedimento migre hacia las zonas bajas, pero no evitan mayormente los efectos de la escorrentía. Por lo anterior, el horizonte superficial es prácticamente inexistente y el terreno presenta una alta compacidad.

El terreno es ondulado a quebrado localizado en una ladera convexa. Los arboles alcanzan gran tamaño debido a la recolección de aguas lluvia por las zonas de infiltración, además se localizan pinos más una plantación relativamente reciente de peumos, los cuales, no superan el metro al altura.



PARAMETROS	HORIZONTES		
	A	B	C
<b>Profundidad (cm)</b>	0 – 8	8 – 45	> 45
<b>Textura</b>	Arena franca	Arena franca	Arena limosa
<b>Presencia de raíces</b>			
Densidad (1 dm <sup>3</sup> )	Fuerte	Mediana	Leve
Tamaño	Muy fina	Fina	Fina
<b>Estructura</b>	Subpoliédrica	Poliédrica	Prismática
<b>Consistencia</b>			
Seco	Duro	Muy duro	Rígido
Húmedo	Friable	Muy firme	Extremadamente firme
<b>Pedregocidad (%)</b>	2	10	15
<b>Color</b>			
Seco	10YR 5/4	7,5YR 4/4	10YR 4/3
Húmedo	10YR 4/4	7,5YR 3,5/4	10YR 4/4
<b>Humedad</b>	Árido	Seco	Seco
<b>Densidad real (gr/cc)</b>			
Aparente	1,40	1,40	1,89
Real	2,15	2,15	2,82

Tabla 7.29. Caracterización de los horizontes en la calicata 1.2. Fuente: Elaboración propia.

PARÁMETROS	CARACTERÍSTICAS
<b>Límites de los horizontes</b>	
Forma	A – B B – C
Nitidez	A – B B – C
<b>Material de origen</b>	Granito intemperizado
<b>Grado de erosión</b>	Severa
<b>Profundidad del suelo</b>	
Fisiológica	45
Efectiva	38,25
<b>Factores limitantes</b>	Pendiente, penetración de raíces, profundidad, drenaje externo

Tabla 7.30. Aspectos generales de la calicata 1.2. Fuente: Elaboración propia

c) *Calicata 1.3*

PARAMETROS	CARACTERISTICAS
<b>Localización (UTM)</b>	0268500 / 6236300
<b>Forma de terreno</b>	Plano a ligeramente ondulado
<b>Obra presente</b>	No se visualizan obras en el sector
<b>Posición fisiográfica</b>	Valle
<b>Ubicación en el relieve</b>	Piedmont
<b>Forma de la ladera</b>	Convexa
<b>Forma del contorno</b>	Convexo
<b>Elevación (msnm)</b>	240
<b>Exposición</b>	–
<b>Pendiente</b>	
Grados (°)	17
Porcentaje (%)	30
Denominación	Inclinación pronunciada
Clase de pendiente	Pronunciada
<b>Estrato arbóreo</b>	Formación arbórea inexistente. Solo arbustos no mayores a un mt y herbáceas
<b>Uso anterior</b>	Agricultura y ganadería
<b>Uso actual</b>	Sin uso establecido
<b>Capacidad de uso</b>	VI

**Tabla 7.31. Características topográficas del sitio de localización de la calicata 1.3.** Sector localizado en la zona baja de la microcuenca en las proximidades del cauce principal. El sector se caracteriza por estar ubicado entre dos colinas y esta fuertemente sometido a la erosión hídrica. Fuente: Elaboración propia.

La calicata se localiza en la zona baja de la microcuenca. En este sector la vegetación es prácticamente inexistente debido a que no se revegeto el lugar durante la implementación del proyecto priorizándose las zonas altas de la microcuenca. El lugar está cercano al cauce principal donde la erosión es muy alta y la pérdida de suelo ha dado lugar a un socavamiento del cauce.

En este sector no se localizan obras de restauración y durante las lluvias de invierno migra material proveniente de las zonas altas, el cual, escurre aguas abajo por el único cauce tipo 2 presente en el lugar. La conformación tipo valle de la microcuenca ha dado lugar a zonas escarpadas con exposición este – oeste, en las cuales, las zonas bajas confluyen en el cauce principal que presenta un gran caudal durante la temporada invernal debido mayoritariamente a la migración de las aguas desde las zonas altas de la microcuenca.

PARAMETROS	HORIZONTES		
	A	B	C
<b>Profundidad (cm)</b>	0 – 10	10 – 45	> 45
<b>Textura</b>	Arena limosa	Arena limosa	Franco arenoso
<b>Presencia de raíces</b>			
Densidad (1 dm <sup>3</sup> )	Mediano	Poco	Leve
Tamaño	Muy fina	Muy fina	Muy fina
<b>Estructura</b>	Subpoliédrica	Poliédrica	Prismática
<b>Consistencia</b>			
Seco	Duro	Muy duro	Muy duro
Húmedo	Friable	Muy firme	Muy firme
<b>Pedregocidad (%)</b>	7	2	2
<b>Color</b>			
Seco	10YR 4/3	10YR 5/5	5YR 5/3
Húmedo	10YR 3/2	10YR 4/4	5YR 4/3.5
<b>Humedad</b>	Seco	Seco	Seco
<b>Densidad (gr/cc)</b>			
Aparente	1,20	1,35	1,79
Real	2,03	2,28	2,75

Tabla 7.32. Caracterización de los horizontes en la calicata 1.3. Fuente: Elaboración propia.

PARÁMETROS	CARACTERÍSTICAS
<b>Límites de los horizontes</b>	
Forma	A – B B – C
Nitidez	A – B B – C
<b>Material de origen</b>	Granito intemperizado
<b>Grado de erosión</b>	Muy severa
<b>Profundidad del suelo</b>	
Fisiológica	45
Efectiva	44,1
<b>Factores limitantes</b>	Drenaje interno, erodabilidad, clima

Tabla 7.33. Aspectos generales de la calicata 1.3. Fuente: Elaboración propia

### 7.2.2.2.2. Microcuenca 2

#### a) Calicata 2.1

PARAMETROS	CARACTERISTICAS
<b>Localización (UTM)</b>	0270150 / 6235750
<b>Forma de terreno</b>	Plano a ligeramente ondulado
<b>Obra presente</b>	No se visualizan obras en el sector
<b>Posición fisiográfica</b>	Lomajes
<b>Ubicación en el relieve</b>	Ladera
<b>Forma de la ladera</b>	Convexa
<b>Forma del contorno</b>	–
<b>Elevación (msnm)</b>	300
<b>Exposición</b>	Este
<b>Pendiente</b>	
Grados (°)	6
Porcentaje (%)	10
Denominación	Ligeramente inclinado
Clase de pendiente	Moderada
<b>Estrato arbóreo</b>	Formación arbórea conformada por eucaliptus y pinos
<b>Uso anterior</b>	Agricultura y ganadería
<b>Uso actual</b>	Preservación
<b>Capacidad de uso</b>	VI

**Tabla 7.34. Características topográficas del sitio de localización de la calicata 2.1.** Punto localizado en la zona alta de la microcuenca 2; esta zona está cubierta con pinos y eucaliptus y es ligeramente inclinada lo que la ha hecho susceptible a la erosión. Fuente: Elaboración propia.

Las zonas altas de la microcuenca 2 se estructuran conformando pequeñas mesetas (en comparación a las zonas altas de la microcuenca 1 las cuales son escarpadas), aunque en términos generales, la ubicación en el relieve corresponde a ladera. Este sector está ligeramente inclinado y hay gran presencia de especies arbóreas mayoritariamente formadas por eucaliptus y pinos, los cuales son conformaciones arbóreas implementadas en el inicio del proyecto.

Aunque la erosión también es alta, en este lugar la escorrentía superficial es ligeramente menos agresiva que en las zonas altas de la microcuenca 1 debido principalmente a la topografía y al tipo de pendiente. En este lugar no se observan obras de restauración hidrológico – forestales.

PARAMETROS	HORIZONTES		
	A	B	C
<b>Profundidad (cm)</b>	0 – 12	12 – 55	> 55
<b>Textura</b>	Arena franca	Arena limosa	Arena limosa
<b>Presencia de raíces</b>			
Densidad (1 dm <sup>3</sup> )	Fuerte	Mediano	Leve
Tamaño	Muy fino	Muy fino	Fino
<b>Estructura</b>	Subpoliédrica	Poliédrica	Prismática
<b>Consistencia</b>			
Seco	Duro	Muy duro	Muy duro
Húmedo	Friable	Friable	Muy firme
<b>Pedregocidad (%)</b>	10	20	30
<b>Color</b>			
Seco	10YR 6/2	10YR 5/4	10YR 5/4
Húmedo	7.5YR 4/4	10YR 3/4	10YR 4/4
<b>Humedad</b>	Seco	Seco	Seco
<b>Densidad (gr/cc)</b>			
Aparente	1,55	1,62	1,92
Real	2,38	2,41	2,86

Tabla 7.35. Caracterización de los horizontes en la calicata 2.1. Fuente. Elaboración propia.

PARÁMETROS	CARACTERÍSTICAS
<b>Límites de los horizontes</b>	
Forma	A – B Irregular B – C irregular
Nitidez	A – B Gradual B – C Claro
<b>Material de origen</b>	Granito intemperizado
<b>Grado de erosión</b>	Severa
<b>Profundidad del suelo</b>	
	Fisiológica 55 Efectiva 38,50
<b>Factores limitantes</b>	Pedregocidad, erodabilidad, clima

Tabla 7.36. Aspectos generales de la calicata 2.1. Fuente: Elaboración propia

b) *Calicata 2.2*

PARAMETROS	CARACTERISTICAS
<b>Localización (UTM)</b>	0270200 / 6235830
<b>Forma de terreno</b>	Ondulado a quebrado
<b>Obra presente</b>	Sacos de tierra y terrazas
<b>Posición fisiográfica</b>	Colina
<b>Ubicación en el relieve</b>	Ladera
<b>Forma de la ladera</b>	Convexa
<b>Forma del contorno</b>	–
<b>Elevación (msnm)</b>	290
<b>Exposición</b>	Este
<b>Pendiente</b>	
Grados (°)	20
Porcentaje (%)	45
Denominación	Inclinación muy pronunciada
Clase de pendiente	Pronunciada
<b>Estrato arbóreo</b>	Formación arbórea conformada por eucaliptus y pinos
<b>Uso anterior</b>	Agricultura y ganadería
<b>Uso actual</b>	Preservación
<b>Capacidad de uso</b>	VI

**Tabla 7.37. Características topográficas del sitio de localización de la calicata 2.2.** Este sector está localizado en una zona de inclinación muy pronunciada y altamente susceptible de erosión, por lo que muchas obras están localizadas en este sector, tales como sacos de tierra y terrazas. Fuente: Elaboración propia.

La localización de la calicata 2.2 se ubica en la zona media de la microcuenca, por lo que la pendiente es pronunciada. A diferencia del punto anterior, en esta zona y alrededores es posible encontrar obras de restauración tales como sacos de tierra y terrazas forestales, además de camellones estructurados hasta las zonas bajas de la ladera. Estas obras han disminuido –en parte– la acción de la erosión aunque la inexistencia de una cubierta vegetal protectora en el suelo no ha impedido el daño ocasionado por la gota de lluvia.

Es este sector de la microcuenca, la tala para la producción de carbón fue la actividad predominante, por lo que la existencia de flora nativa se remite solo a unos pocos individuos aislados que no forman grandes conglomerados. La vegetación existente en el lugar está formada mayoritariamente por eucaliptus y pinos procedentes de la reforestación efectuada en los primeros años del proyecto.

PARAMETROS	HORIZONTES		
	A	B	C
<b>Profundidad (cm)</b>	0 – 8	8 – 45	> 45
<b>Textura</b>	Arena franca	Arena limosa	Arena limosa
<b>Presencia de raíces</b>			
Densidad (1 dm <sup>3</sup> )	Mediano	Mediano	Leve
Tamaño	Muy fino	Muy fino	Fino
<b>Estructura</b>	Granular	Poliédrica	Masiva
<b>Consistencia</b>			
Seco	Duro	Muy duro	Extremadamente duro
Húmedo	Friable	Muy firme	Muy firme
<b>Pedregocidad (%)</b>	1	5	15
<b>Color</b>			
Seco	7.5YR 5/3	7.5YR 5/4	10YR 5/4
Húmedo	7.5YR 3/3	7.5YR 4/4	10YR 4/4
<b>Humedad</b>	Árido	Seco	Seco
<b>Densidad (gr/cc)</b>			
Aparente	1,23	1,56	1,82
Real	2,12	2,32	2,71

Tabla 7.38. Caracterización de los horizontes en la calicata 2.2. Fuente. Elaboración propia.

PARÁMETROS	CARACTERÍSTICAS
<b>Límites de los horizontes</b>	
Forma	A – B Irregular B – C Irregular
Nitidez	A – B Claro B – C Claro
<b>Material de origen</b>	Granito intemperizado
<b>Grado de erosión</b>	Severa
<b>Profundidad del suelo</b>	
Fisiológica	45
Efectiva	38,25
<b>Factores limitantes</b>	Drenaje externo, pendiente, falta de nutrientes, erodabilidad

Tabla 7.39. Aspectos generales de la calicata 2.2. Fuente: Elaboración propia

c) *Calicata 2.3*

PARAMETROS	CARACTERISTICAS
<b>Localización (UTM)</b>	0270240 / 6235900
<b>Forma de terreno</b>	Plano a ligeramente ondulada
<b>Obra presente</b>	No se visualizan obras en el sector
<b>Posición fisiográfica</b>	Terraza aluvial
<b>Ubicación en el relieve</b>	Piedmont
<b>Forma de la ladera</b>	–
<b>Forma del contorno</b>	Convexo
<b>Elevación (msnm)</b>	280
<b>Exposición</b>	–
<b>Pendiente</b>	
Grados (°)	3
Porcentaje (%)	5
Denominación	Casi plano
Clase de pendiente	Suave
<b>Estrato arbóreo</b>	Presencia de espinos de gran tamaño y herbáceas
<b>Uso anterior</b>	Agricultura y ganadería
<b>Uso actual</b>	Preservación
<b>Capacidad de uso</b>	VI

**Tabla 7.40. Características topográficas del sitio de localización de la calicata 2.3.** Esta calicata se ubica en un sector casi plano en la zona baja de la microcuenca; este sector se cubre con herbáceas en la temporada invernal y recibe los sedimentos de los sectores altos. Fuente: Elaboración propia.

Este sector se localiza en la zona baja de la microcuenca 2; la zona es plana a ligeramente ondulada formándose pequeñas planicies en las cuales hay gran infiltración de agua durante la temporada invernal (en comparación a las zonas altas y medias de la microcuenca), motivo por el cual hay un alto porcentaje de herbáceas en el sector. Es posible encontrar zonas de sedimentación debido a la presencia del cauce principal, el cual, presenta un notorio socavamiento a lo largo de gran parte de su extensión debido a la escorrentía invernal. El arrastre de material generado por el caudal del cauce y por la escorrentía en las laderas durante el invierno ha producido que en toda esta zona exista acumulación de sedimento.

No se observan en el lugar pisos de erosión, por lo que la pérdida de suelo –si bien es notoria en toda la microcuenca– se ha controlado en forma ligera debido a las plantaciones efectuadas en el lugar durante la implementación del proyecto.



PARAMETROS	HORIZONTES		
	A	B	C
<b>Profundidad (cm)</b>	0 – 20	20 – 80	> 80
<b>Textura</b>	Franco arenoso	Franco arenoso	Arena arcillosa
<b>Presencia de raíces</b>			
Densidad (1 dm <sup>3</sup> )	Fuerte	Mediano	Leve
Tamaño	Muy fino	Muy fino	Fino
<b>Estructura</b>	Grano simple	Granular	Masiva
<b>Consistencia</b>			
Seco	Duro	Muy duro	Rígido
Húmedo	Friable	Muy firme	Algo rígido
<b>Pedregocidad (%)</b>	1	5	10
<b>Color</b>			
Seco	10YR 6/4	5YR 4/6	5YR 3/6
Húmedo	10YR 4/4	5YR 4/8	5YR 3/6
<b>Humedad</b>	Seco	Seco	Seco
<b>Densidad (gr/cc)</b>			
Aparente	1,41	1,43	1,75
Real	2,23	2,26	2,50

Tabla 7.41. Caracterización de los horizontes en la calicata 2.3. Fuente. Elaboración propia.

PARÁMETROS	CARACTERÍSTICAS
<b>Límites de los horizontes</b>	
Forma	A – B B – C
Nitidez	A – B B – C
<b>Material de origen</b>	Granito intemperizado
<b>Grado de erosión</b>	Moderada
<b>Profundidad del suelo</b>	
Fisiológica	80
Efectiva	72
<b>Factores limitantes</b>	Erodabilidad, consistencia, drenaje externo

Tabla 7.42. Aspectos generales de la calicata 2.3. Fuente: Elaboración propia.

### 7.2.2.2.3. Microcuenca 3

#### a) Calicata 3.1

PARAMETROS	CARACTERISTICAS
<b>Localización (UTM)</b>	0270400 / 6235400
<b>Forma de terreno</b>	Plano a ligeramente ondulado
<b>Obra presente</b>	No se visualizan obras en el sector
<b>Posición fisiográfica</b>	Terraza o plano remanente
<b>Ubicación en el relieve</b>	Ladera
<b>Forma de la ladera</b>	Convexa
<b>Forma del contorno</b>	–
<b>Elevación (msnm)</b>	290
<b>Exposición</b>	Oeste
<b>Pendiente</b>	
Grados (°)	6
Porcentaje (%)	10
Denominación	Ligeramente inclinado
Clase de pendiente	Moderada
<b>Estrato arbóreo</b>	Formación arbórea conformada por eucaliptus y pinos
<b>Uso anterior</b>	Agricultura y ganadería
<b>Uso actual</b>	Extracción de leña
<b>Capacidad de uso</b>	VI

**Tabla 7.43. Características topográficas del sitio de localización de la calicata 3.1.** Este sector se localiza en un lugar habitado por lo que el suelo está altamente compactado y erosionado; solo hay pinos y eucaliptus; el suelo no presenta una capa vegetal que lo proteja de la erosión. Este sector se localiza en la zona alta de la microcuenca 3. Fuente: Elaboración propia.

Este lugar se localiza en la microcuenca 3 en la zona superior, la cual presenta una condición topográfica distinta a la microcuenca 2, aunque, con características similares. La erosión en este lugar es muy severa producto de la intervención humana principalmente en lo relativo a la agricultura y ganadería; aunque aún está habitada, solo hay una familia en el lugar por lo que los efectos antrópicos son significativamente menores respecto de décadas pasadas. En este sector la compactación del suelo es alta por lo que la infiltración es baja, a esto se suma la inexistencia de una capa vegetal que impida la escorrentía superficial.

La presencia de pinos y eucaliptus no ha impedido el avance de la erosión; y debido al constante tráfico humano y animal por las zonas altas de la microcuenca no se han implementado obras de restauración hidrológica – forestales.

PARAMETROS	HORIZONTES		
	A	B	C
<b>Profundidad (cm)</b>	0 – 10	10 – 60	> 60
<b>Textura</b>	Franco arenoso	Franco arenoso	Franco arenoso
<b>Presencia de raíces</b>			
Densidad (1 dm <sup>3</sup> )	Fuerte	Fuerte	Mediano
Tamaño	Fina	Fina	Muy fina
<b>Estructura</b>	Granular	Subpoliédrica	Masiva
<b>Consistencia</b>			
Seco	Duro	Muy duro	Extremadamente duro
Húmedo	Friable	Firme	Muy firme
<b>Pedregocidad (%)</b>	2	5	10
<b>Color</b>			
Seco	5YR 4/6	5YR 3/6	7.5YR 5/6
Húmedo	5YR 4/8	5YR 3/6	7.5YR 4,5/6
<b>Humedad</b>	Árido	Seco	Seco
<b>Densidad (gr/cc)</b>			
Aparente	1,38	1,45	2,00
Real	2,19	2,30	3,17

Tabla 7.44. Caracterización de los horizontes en la calicata 3.1. Fuente: Elaboración propia

PARÁMETROS	CARACTERÍSTICAS
<b>Límites de los horizontes</b>	
Forma	A – B B – C
Nitidez	A – B B – C
<b>Material de origen</b>	Granito intemperizado
<b>Grado de erosión</b>	Severa
<b>Profundidad del suelo</b>	
Fisiológica	60
Efectiva	54
<b>Factores limitantes</b>	Erodabilidad, drenaje externo, drenaje interno, pedregocidad

Tabla 7.45. Aspectos generales de la calicata 3.1. Fuente: Elaboración propia

b) *Calicata 3.2*

PARAMETROS	CARACTERISTICAS
<b>Localización (UTM)</b>	0270200 / 6235370
<b>Forma de terreno</b>	Ondulado a quebrado
<b>Obra presente</b>	No se visualizan obras en el sector
<b>Posición fisiográfica</b>	Terraza o plano remanente
<b>Ubicación en el relieve</b>	Ladera
<b>Forma de la ladera</b>	Convexa
<b>Forma del contorno</b>	–
<b>Elevación (msnm)</b>	280
<b>Exposición</b>	Oeste
<b>Pendiente</b>	
Grados (°)	17
Porcentaje (%)	30
Denominación	Inclinación pronunciada
Clase de pendiente	Pronunciada
<b>Estrato arbóreo</b>	Formación arbórea conformada por eucaliptus y pinos
<b>Uso anterior</b>	Agricultura y ganadería
<b>Uso actual</b>	Extracción de leña
<b>Capacidad de uso</b>	VI

**Tabla 7.46. Características topográficas del sitio de localización de la calicata 3.2.** Esta zona se caracteriza por su alto grado de erosión a pesar de las labores de reforestación efectuadas en este lugar. EL suelo no ha podido recuperar una cubierta vegetal que lo proteja de la acción de la gota de agua ni de la escorrentía superficial. La zona es muy pronunciada y el suelo es delgado. Fuente: Elaboración propia.

La diferencia de altitud no es significativamente alta, en comparación a los otros puntos de la microcuenca, por lo que el paisaje presenta ciertas similitudes, aunque, fisiográfica y topográficamente son diferentes.

El sector es ondulado a quebrado y no hay obras de restauración en el lugar, sin embargo, en la ladera de exposición norte hay gran presencia de sacos de tierra y diques de postes. La ladera es de inclinación pronunciada y sin presencia de un piso vegetal (solo árboles en forma aislada que no forma un conglomerado arbóreo), lo que ha aumentado los procesos erosivos. La escorrentía superficial ha aumentado el nivel de erosión en los últimos años

PARAMETROS	HORIZONTES		
	A	B	C
<b>Profundidad (cm)</b>	0 – 8	8 – 50	> 50
<b>Textura</b>	Arena franca	Arena franca	Arena franca
<b>Presencia de raíces</b>			
Densidad (1 dm <sup>3</sup> )	Fuerte	Fuerte	Mediano
Tamaño	Fina	Fina	Muy fina
<b>Estructura</b>	Granular	Subpoliédrica	Prismática
<b>Consistencia</b>			
Seco	Duro	Muy duro	Extremadamente duro
Húmedo	Friable	Firme	Muy firme
<b>Pedregocidad (%)</b>	2	5	15
<b>Color</b>			
Seco	7,5YR 5/4	5YR 5/6	5YR 5/6
Húmedo	7.5YR 4/4	5YR 4/6	5YR 4/6
<b>Humedad</b>	Árido	Seco	Seco
<b>Densidad (gr/cc)</b>			
Aparente	1,41	1,43	1,75
Real	2,16	2,20	2,69

Tabla 7.47. Caracterización de los horizontes en la calicata 3.2. Fuente: Elaboración propia

PARÁMETROS	CARACTERÍSTICAS
<b>Límites de los horizontes</b>	
Forma	A – B Irregular B – C Irregular
Nitidez	A – B Claro B – C Gradual
<b>Material de origen</b>	Granito intemperizado
<b>Grado de erosión</b>	Severa
<b>Profundidad del suelo</b>	
Fisiológica	50
Efectiva	42,50
<b>Factores limitantes</b>	Pendiente, rocosidad, drenaje interno, drenaje externo, falta de nutrientes

Tabla 7.48. Aspectos generales de la calicata 3.2. Fuente: Elaboración propia

c) *Calicata 3.3*

PARAMETROS	CARACTERISTICAS
<b>Localización (UTM)</b>	0270100 / 6235350
<b>Forma de terreno</b>	Plano a ligeramente ondulado
<b>Obra presente</b>	Diques de postes, muro de postes de madera, sacos de tierra.
<b>Posición fisiográfica</b>	Lomaje
<b>Ubicación en el relieve</b>	Hondonada
<b>Forma de la ladera</b>	Convexa
<b>Forma del contorno</b>	Convexa
<b>Elevación (msnm)</b>	270
<b>Exposición</b>	–
<b>Pendiente</b>	
Grados (°)	3
Porcentaje (%)	5
Denominación	Casi plano
Clase de pendiente	suave
<b>Estrato arbóreo</b>	Formación arbórea conformada por eucaliptus y pinos
<b>Uso anterior</b>	Agricultura y ganadería
<b>Uso actual</b>	Extracción de leña
<b>Capacidad de uso</b>	VI

**Tabla 7.49. Características topográficas del sitio de localización de la calicata 3.3.** Este sector se caracteriza por su alto grado de erosión y la delgadez del suelo. La erosión es muy severa formando amplias cárcavas en este lugar. El sitio se localiza en la parte más baja de la microcuenca en las proximidades del cauce principal. Fuente: Elaboración propia.

La calicata 3.3 se construyó en la zona baja de la microcuenca en las cercanías del cauce principal. En los alrededores se construyeron obras de restauración tales como conjunto de duques de postes, muros der postes de madera, y sacos de tierra (para contener los sedimentos y para encauzar la escorrentía).

La zona es plana a ondulada, aunque ciertos sectores se caracterizan por una gran presencia de cárcavas producto de la intensa erosión que afecta al lugar, la cual, se acentúa producto de la nula presencia de vegetación. El sector se localiza en una hondonada producida por la topografía accidentada del lugar (que es propio de sectores localizados en la Cordillera de los Costa) lo que ha dado origen a laderas de tipo convexas que son las que priman en el lugar.

PARAMETROS	HORIZONTES		
	A	B	C
<b>Profundidad (cm)</b>	0 – 10	10 – 80	> 80
<b>Textura</b>	Arena limosa	Arena limosa	Arena limosa
<b>Presencia de raíces</b>			
Densidad (1 dm <sup>3</sup> )	Fuerte	Fuerte	Mediano
Tamaño	Fina	Fina	Muy fina
<b>Estructura</b>	Granular	Poliédrica	Prismática
<b>Consistencia</b>			
Seco	Duro	Muy duro	Rígido
Húmedo	Friable	Extremadamente firme	Algo rígido
<b>Pedregocidad (%)</b>	2	5	5
<b>Color</b>			
Seco	5YR 5/6	5YR 5/6	7.5YR5.5/6
Húmedo	5YR 4/6	5YR 4/6	7.5YR 4,5/6
<b>Humedad</b>	Árido	Seco	Seco
<b>Densidad (gr/cc)</b>			
Aparente	1,50	1,62	2,00
Real	2,23	2,41	2,98

Tabla 7.50. Caracterización de los horizontes en la calicata 3.3. Fuente: Elaboración propia

PARÁMETROS	CARACTERÍSTICAS
<b>Límites de los horizontes</b>	
Forma	A – B Irregular B – C Ondulado
Nitidez	A – B Gradual B – C Claro
<b>Material de origen</b>	Granito intemperizado
<b>Grado de erosión</b>	Muy severa
<b>Profundidad del suelo</b>	
Fisiológica	80
Efectiva	76
<b>Factores limitantes</b>	Rocosidad, erodabilidad, clima

Tabla 7.51. Aspectos generales de la calicata 3.3. Fuente: Elaboración propia.

#### 7.2.2.2.4. Microcuenca 4

##### a) Calicata 4.1

PARAMETROS	CARACTERISTICAS
<b>Localización (UTM)</b>	0270600 / 6235800
<b>Forma de terreno</b>	Plano aligeramente ondulado
<b>Obra presente</b>	No se visualizan obras en el sector
<b>Posición fisiográfica</b>	Lomaje
<b>Ubicación en el relieve</b>	Ladera
<b>Forma de la ladera</b>	Convexa
<b>Forma del contorno</b>	–
<b>Elevación (msnm)</b>	320
<b>Exposición</b>	Norte
<b>Pendiente</b>	
Grados (°)	6
Porcentaje (%)	10
Denominación	Ligeramente inclinado
Clase de pendiente	Moderada
<b>Estrato arbóreo</b>	Arbustos muy aislados y de bajo tamaño, herbáceas
<b>Uso anterior</b>	Extracción de leña y ganadería
<b>Uso actual</b>	Sin uso establecido
<b>Capacidad de uso</b>	VI

**Tabla 7.52. Características topográficas del sitio de localización de la calicata 4.1.** Punto localizado en la más alta de la microcuenca 4; este lugar está fuertemente erosionado debido a la topografía del lugar, los efectos antrópicos y la inexistencia de obras de restauración. El suelo está levemente cubierto con herbáceas que no impide la acción de la gota de lluvia ni los efectos de la escorrentía. Fuente: Elaboración propia.

El sector mantiene características similares a las otras microcuencas en cuanto a la forma del terreno, pero en este lugar la fisiografía cambia observándose una zona de lomaje. En esta cuenca no hay obras presentes y los sectores altos se caracterizan por la alta compacidad del terreno y el alto grado de erosión presente en el lugar, la vegetación es muy escasa y solo se remite a arbustos aislados que no superan los 1,5 metros de altura.

La ladera es convexa al igual que en la mayoría de los casos anteriores lo que explica en parte la erosividad presente en las microcuencas. El sector fue usado para la ganadería (especialmente caprina) y como lugar de tala para la producción de carbón por lo que la erosión ha eliminado la parte superficial del suelo y los arboles de gran envergadura son inexistentes.



PARAMETROS	HORIZONTES		
	A	B	C
<b>Profundidad (cm)</b>	0 – 6	6 – 40	> 40
<b>Textura</b>	Arena franca	Arena franca	Arena limosa
<b>Presencia de raíces</b>			
Densidad (1 dm <sup>3</sup> )	Mediano	Poco	Poco
Tamaño	Fina	Fina	Muy fina
<b>Estructura</b>	Granular	Subpoliédrica	Prismática
<b>Consistencia</b>			
Seco	Duro	Muy duro	Extremadamente duro
Húmedo	Friable	Muy firme	Extremadamente firme
<b>Pedregocidad (%)</b>	10	7	25
<b>Color</b>			
Seco	10YR 5/4	10YR 4/4	7.5YR 5/6
Húmedo	10YR 3.5/4	10YR 3/4	7.5YR 4/4
<b>Humedad</b>	Árido	Árido	Seco
<b>Densidad (gr/cc)</b>			
Aparente	1,56	1,60	2,00
Real	2,40	2,46	2,98

Tabla 7.53. Caracterización de los horizontes en la calicata 4.1. Elaboración propia.

PARÁMETROS	CARACTERÍSTICAS
<b>Límites de los horizontes</b>	
Forma	A – B B – C
Nitidez	A – B B – C
<b>Material de origen</b>	Granito intemperizado
<b>Grado de erosión</b>	Muy severa
<b>Profundidad del suelo</b>	
Fisiológica	40
Efectiva	30
<b>Factores limitantes</b>	Pedregocidad, rocosidad, erodabilidad, drenaje externo, drenaje interno

Tabla 7.54. Aspectos generales de la calicata 4.1. Fuente: Elaboración propia

b) *Calicata 4.2*

PARAMETROS	CARACTERISTICAS
<b>Localización (UTM)</b>	0270600 / 6235900
<b>Forma de terreno</b>	Ondulado a quebrado
<b>Obra presente</b>	No se visualizan obras en el sector
<b>Posición fisiográfica</b>	Colina
<b>Ubicación en el relieve</b>	Ladera
<b>Forma de la ladera</b>	Convexa
<b>Forma del contorno</b>	–
<b>Elevación (msnm)</b>	300
<b>Exposición</b>	Norte
<b>Pendiente</b>	
Grados (°)	17
Porcentaje (%)	30
Denominación	Inclinación pronunciada
Clase de pendiente	Pronunciada
<b>Estrato arbóreo</b>	Arbustos muy aislados y de bajo tamaño, herbáceas
<b>Uso anterior</b>	Extracción de leña y ganadería
<b>Uso actual</b>	Sin uso establecido
<b>Capacidad de uso</b>	VI

**Tabla 7.55. Características topográficas del sitio de localización de la calicata 4.2.** Punto localizado en la zona media de la microcuenca en la ladera de exposición norte por lo que la erosión es mayor y la presencia de vegetación disminuye notablemente en comparación a la zona superior y a la ladera de exposición sur. El suelo está altamente compactado y la erosión es muy severa. Fuente. Elaboración propia.

En este sector de la microcuenca, la erosión es evidente y se cataloga como muy severa, debido a la escorrentía superficial y la inexistencia de una cubierta vegetal que proteja el suelo. Al igual que en el caso anterior, aquí no hay obras hidrológico - forestales ni implementación de planes de reforestación.

El lugar es ondulado a quebrado y se localiza en la ladera de exposición norte (con inclinación pronunciada) en la zona media de la microcuenca. Los arbustos son muy aislados, los cuales no superan el 1,5 metros de altura. No hay conglomerados arbóreos debido a la deforestación ocasionada por la tala indiscriminada de leña para su uso como combustible. La presencia de cárcavas en el lugar es muy notoria al igual que los pisos de erosión debido a la pérdida de suelo y la acción de la escorrentía superficial.

PARAMETROS	HORIZONTES		
	A	B	C
<b>Profundidad (cm)</b>	0 – 6	6 – 40	> 40
<b>Textura</b>	Arena franca	Arena franca	Arena limosa
<b>Presencia de raíces</b>			
Densidad (1 dm <sup>3</sup> )	Mediano	Poco	Poco
Tamaño	Fina	Fina	Muy fina
<b>Estructura</b>	Granular	Masiva	Prismática
<b>Consistencia</b>			
Seco	Duro	Muy duro	Rígido
Húmedo	Friable	Muy firme	Algo rígido
<b>Pedregocidad (%)</b>	5	10	15
<b>Color</b>			
Seco	10YR 4/4	7.5YR 5/6	10YR 5/4
Húmedo	10YR 3/4	7.5YR 4/4	10YR 4/5
<b>Humedad</b>	Árido	Árido	Seco
<b>Densidad (gr/cc)</b>			
Aparente	1,56	1,60	2,00
Real	2,40	2,46	2,98

Tabla 7.56. Caracterización de los horizontes en la calicata 4.2. Fuente: Elaboración propia

PARÁMETROS	CARACTERÍSTICAS
<b>Límites de los horizontes</b>	
Forma	A – B Irregular B – C Ondulado
Nitidez	A – B Claro B – C Gradual
<b>Material de origen</b>	Granito intemperizado
<b>Grado de erosión</b>	Muy severa
<b>Profundidad del suelo</b>	
Fisiológica	40
Efectiva	34
<b>Factores limitantes</b>	Pendiente, drenaje externo, drenaje interno, erodabilidad, falta de nutrientes

Tabla 7.57. Aspectos generales de la calicata 4.2. Fuente: Elaboración propia

c) *Calicata 4.3*

PARAMETROS	CARACTERISTICAS
<b>Localización (UTM)</b>	0270600 / 6236000
<b>Forma de terreno</b>	Plano a ligeramente ondulado
<b>Obra presente</b>	No se visualizan obras en el sector
<b>Posición fisiográfica</b>	Valle
<b>Ubicación en el relieve</b>	Piedmont
<b>Forma de la ladera</b>	Convexa
<b>Forma del contorno</b>	Convexo
<b>Elevación (msnm)</b>	280
<b>Exposición</b>	Norte
<b>Pendiente</b>	
Grados (°)	6
Porcentaje (%)	10
Denominación	Ligeramente inclinado
Clase de pendiente	Moderada
<b>Estrato arbóreo</b>	Arbustos muy aislados y de bajo tamaño, herbáceas
<b>Uso anterior</b>	Extracción de leña y ganadería
<b>Uso actual</b>	Sin uso establecido
<b>Capacidad de uso</b>	VI

**Tabla 7.58. Características topográficas del sitio de localización de la calicata 4.3.** Zona localizada en el sector bajo de la microcuenca; solo se observan arbustos muy aislados que se localizan cerca del cauce principal. El suelo es delgado y con erosión muy severa, por lo que ha dado a lugar a grandes cárcavas. Fuente: Elaboración propia

Este sector se localiza en la zona baja de la microcuenca en las proximidades del cauce principal. Al igual que en el caso anterior, el terreno es ondulado a quebrado (como todo el sector) y se localiza en una posición fisiográfica que se clasifica como “valle” debido a su localización en la zona baja de las laderas. Los arbustos son muy aislados y los conglomerados solo consisten en unos cuantos individuos que no constituyen formaciones de gran relevancia para la generación de una homeostasis en el lugar y no cumple con los requerimientos necesarios para impedir los procesos erosivos.

El suelo es ligeramente inclinado hacia el norte con una pendiente de clase moderada. La presencia de cárcavas es muy común en todo el sector, ya que, los procesos erosivos han impactado en forma más intensa debido a la inexistencia de planes de restauración; no existiendo una capa vegetal que proteja contra la acción de la gota de lluvia. Esta microcuenca es la denominada “microcuenca testigo” y ha sido evidente la acción erosiva por la falta de planes concretos de reforestación.

PARAMETROS	HORIZONTES		
	A	B	C
<b>Profundidad (cm)</b>	0 – 10	10 – 60	> 60
<b>Textura</b>	Arena franca	Arena franca	Arena limosa
<b>Presencia de raíces</b>			
Densidad (1 dm <sup>3</sup> )	Mediano	Poco	Poco
Tamaño	Fina	Fina	Muy fina
<b>Estructura</b>	Subpoliédrica	Poliédrica	Masiva
<b>Consistencia</b>			
Seco	Duro	Muy duro	Rígido
Húmedo	Friable	Muy firme	Algo rígido
<b>Pedregocidad (%)</b>	5	20	15
<b>Color</b>			
Seco	7.5YR 5/4	10YR 5/4	10YR 5.5/4
Húmedo	7.5YR 4/4	10YR 4/3	10YR 4/6
<b>Humedad</b>	Árido	Árido	Seco
<b>Densidad (gr/cc)</b>			
Aparente	1,48	1,60	1,91
Real	2,27	2,46	2,85

Tabla 7.59. Caracterización de los horizontes en la calicata 4.3. Fuente: Elaboración propia

PARÁMETROS	CARACTERÍSTICAS
<b>Límites de los horizontes</b>	
Forma	A – B B – C
Nitidez	A – B B – C
<b>Material de origen</b>	Granito intemperizado
<b>Grado de erosión</b>	Muy severa
<b>Profundidad del suelo</b>	
Fisiológica	60
Efectiva	51
<b>Factores limitantes</b>	Erodabilidad, drenaje interno, falta de nutrientes, pedregocidad

Tabla 7.60. Aspectos generales de la calicata 4.3. Fuente: Elaboración propia

En la zona superior de la microcuenca 1, predominan los suelos francos moderadamente profundos. La consistencia va de “duro” a “extremadamente duro”, lo cual dificulta el desarrollo de raíces finas limitando en desarrollo de herbáceas. La estructura cambia con los horizontes siendo granular en la zona superior, para cambiar a masiva en las zonas inferiores, con lo cual, la pedregocidad también cambia, siendo directamente proporcional a la profundidad del suelo variando de un 2 a un 15%. La consistencia es dura producto de las estaciones marcadas que presenta la zona central de Chile y las prolongadas sequías que el país ha experimentado desde los años 60. Los límites entre los horizontes presentan una forma irregular, aunque, una clara nitidez.

Se observa abundante cuarzo y una erosión severa en la zona superior producto de las actividades agrícolas y ganaderas realizadas en la zona.

La zona media de la microcuenca se caracteriza por presentar laderas pronunciadas de exposición este – oeste, con un terreno ondulado y convexo una alta escorrentía superficial durante eventos pluviométricos. En las laderas predominan las arenas francas y limosas duras y muy duras en estado seco, siendo el suelo moderadamente profundo con horizontes marcados entre A y B y gradual entre B y C. la estructura va de poliédrica a prismática observando abundante cuarzo.

La calicata 1.3 se localiza en la zona baja de la microcuenca siendo el suelo levemente más profundo que en las zonas superiores de la microcuencas presumiblemente por la deposición de material proveniente de las zonas altas, fenómeno que se acrecentó con la pérdida de vegetación lo que originó una mayor pérdida de suelo hacia las zonas inferiores de las laderas. Hay predominio de arenas limosas con estructura poliédrica y subpoliédrica con horizontes marcados con transiciones que fluctúan entre los 10 y 45 centímetros. En la parte baja predominan los suelos duros y muy duros con un porcentaje de pedregocidad que fluctúa entre los 2 y el 7%.

En la microcuenca 2, los suelos son levemente profundos en la zona alta con horizontes de forma irregular que van entre los 12 y los 55 cm de profundidad. El color es claro en los horizontes A cambiando en los niveles más profundos aumentando con ello su dureza y disminuyendo la cantidad de raíces presentes. En este sector predominan las arenas francas y limosas con abundante cuarzo en las zonas más profundas de la calicata; cabe consignar que la pedregocidad es directamente proporcional a la profundidad del suelo.

La zona media de la microcuenca tiene un suelo menos profundo que las zonas superiores, presumiblemente por la pendiente y la escorrentía superficial que ha hecho perder suelo en las temporadas invernales por el arrastre generado durante décadas de erosión. Al igual que en la zona superior, aquí predominan las arenas francas y limosas con horizontes de nitidez callara y forma irregular. Dada la baja infiltración y las estaciones marcadas, esta zona de la microcuenca presenta suelos duros en el horizonte A y muy duros en el horizonte C.

En la zona baja de la microcuenca el horizonte C es visible a los 80 cm lo cual indica que esta zona tiene suelos más profundos presumiblemente a la sedimentación generada en las temporadas invernales. A diferencia de los suelos de las zonas altas, aquí predominan los suelos francos con una pedregocidad que no supera el 10 % y formados con granito intemperizado. Los horizontes tienen forma lineal y ondulada con una nitidez gradual entre uno y otro.

La microcuenca 3 presenta suelos francos en las zonas superiores encontrándose los horizontes B y C a los 10 y 60 cm respectivamente con una estructura granular en la zona superior y masiva en la zona inferior del suelo. La consistencia de este, es variable según las condiciones estacionales, esto significa que el suelo es duro a extremadamente duro en estado seco y friable a muy firme durante los eventos pluviométricos. Los suelos son mayoritariamente francos arenosos, lo que es perceptible al tacto y en los análisis de los horizontes en los distintos estratos.

Sin embargo, en la zona media se encuentran arenas francas en suelos más delgados que en la zona superior, debido a la constante erosividad y pérdida de suelo producido en la temporadas invernales, fenómeno que también ocurre en las microcuencas 1 y 2. La estructura es granular a prismática con una consistencia que fluctúa entre dura a muy dura con abundante cuarzo en las zonas más bajas de la calicata.

En las zonas más bajas, los suelos están constituidos por arenas limosas en que los horizontes B y C aparecen a los 10 y 80 cm respectivamente. El material de formación es granito intemperizado con abundante cuarzo lo que es característico en la zona de Alto Loica.

En la microcuenca 4, las condiciones no difieren mucho en términos generales a los suelos de las microcuencas 1, 2 y 3 a pesar que en ellas no se ha efectuado (ni implementado) ninguna obra de restauración hidrológica forestal.

Los suelos en esta microcuenca están formados por suelos delgados con arenas francas en la zona alta con una consistencia “extremadamente dura” y “extremadamente firme” en condiciones seca y húmeda respectivamente lo que implica que en este sector las condiciones climáticas actúan con más severidad al no estar presente una capa vegetal que proteja en suelo en las temporadas estivales. Existe además un elevado porcentaje de pedregocidad alcanzando el 25 % en el estrato C.

En la zona media de la microcuenca los suelos son igualmente delgados predominando las arenas francas; los horizontes B y C aparecen a los 6 y 40 centímetros respectivamente con una baja densidad de raíces en comparación a las anteriores microcuencas. La consistencia del suelo es “dura” a “rígida” en estado seco lo que indica el efecto de las estaciones marcadas en los suelos.

Las zonas bajas de la microcuenca en cambio, presenta suelos levemente más gruesos que en las zonas media y alta encontrándose el horizonte C a los 60 centímetros de profundidad. La forma de los horizontes es ondulada y regular y la nitidez es clara y gradual en los horizontes más profundos.

### 7.2.3. Estudio hidrológico

La fertilidad del suelo se correlaciona con su capacidad para retener agua y nutrientes (Schlatter, et al, 2003), por lo tanto, la cuantificación de la capacidad de éste para la retención de agua así como la humedad que puede retener resulta vital para estimar la capacidad de este para otorgar bienes y servicios.

Microcuenca	Localización	CC (%)	PMP (%)	CAA (%)	CAA (mm)
1	0268490/ 6236420	31	17	14	25,2
	0268500 / 6236380	26	11	15	27
	0268500 / 6236300	24	6	18	32.4
2	0270150 / 6235750	24	7	17	30.6
	0270200 / 6235830	24	7	17	30.6
	0270240 / 6235900	31	17	14	25.2
3	0270400 / 6235400	31	17	14	25.2
	0270200 / 6235370	26	11	15	27
	0270100 / 6235350	24	7	17	30.6
4	0270600 / 6235800	26	11	15	27
	0270600 / 6235900	26	11	15	27
	0270600 / 6236000	26	11	15	27

**Tabla 7.61. Parámetros de agua aprovechable en el suelo.** La tabla indica los valores de capacidad de campo (CC), punto de marchites permanente (PMP) y Capacidad de agua aprovechable en porcentaje y en mm de agua almacenables por el suelo a 20 cm de profundidad. El cálculo se efectuó sin factor de corrección debido a que el contenido de materia orgánica no supera el 2 %. Los valores además, se correlacionan con los valores estándares para estos suelos. Fuente: Elaboración propia

Los valores expresan que en Alto Loica la fertilidad está fuertemente delimitada por los parámetros descritos, los valores indican que el agua disponible es baja en comparación a otros suelos (principalmente de la zona sur), esto explica porque la vegetación está constituida principalmente por arboles de gran tamaño y la gran compacidad de suelos.

	CC	PMP	CAA (%)	CAA (mm)
CAA (mm)	-0,87758533	-0,94800662	0,99715504	1
CAA (%)	-0,85434186	-0,93286524	1	
PMP	0,98419917	1		
CC	1			

**Tabla 7.62. Matriz de correlación de los factores relativos al agua aprovechable del suelo.** Los valores fluctúan en coeficientes cercanos a 1 y -1 lo que relaciona en forma coherente los parámetros descritos. Fuente: Elaboración propia.



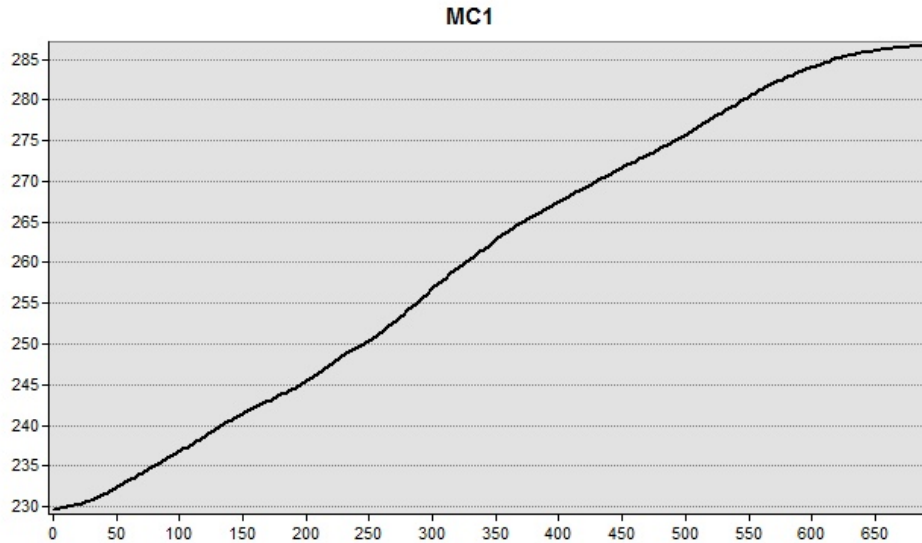
En otro aspecto, la clasificación de Horton determina la existencia de cauces tipos 1 y 2 para las microcuencas 1 y 3 y cauces tipo 1, 2 y 3 para las microcuencas 2 y 4. De esta forma, la mayores longitudes totales para los cauces tipo 1 se encuentran en las microcuencas 2 y 4, lo cual, implica que la probabilidad que las precipitaciones encuentren un cauce es mayor en estas últimas cuencas

Orden del cauce	N° de cauces	Relación de bifurcación	Longitud total (mt)	Longitud Prom. (mt)	Relación de longitud
<b>Microcuenca 1</b>					
Tipo 1	3	3,00	435,62	145,20	3,02
Tipo 2	1	0	439,13	439,13	0
<b>Microcuenca 2</b>					
Tipo 1	8	4	1050,25	131,28	1,62
Tipo 2	2	2	425,60	212,8	0,67
Tipo 3	1	0	143,25	143,25	0
<b>Microcuenca 3</b>					
Tipo 1	5	5	2500	500	0,44
Tipo 2	1	0	220	220	0
<b>Microcuenca 4</b>					
Tipo 1	10	3,33	1026,93	102,69	3,52
Tipo 2	3	3,00	1086,72	362,24	1,61
Tipo 3	1	0	583,33	583,33	0

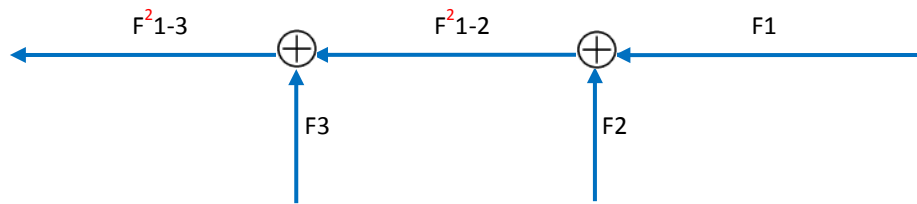
**Tabla 7.63. Parámetros relativos a la red de drenaje en función de los órdenes de cauces.** La clasificación de los cauces en esta tabla esta efectuada según la clasificación de Horton, según el cual, solo las microcuencas 2 y 4 presentan cauces tipo 3, estas últimas también, tienen la mayor cantidad de cauces tipo 1. Fuente: Elaboración propia.

La mayor cantidad de cauces en función de su clasificación se encuentran en la microcuenca 4, lo cual, indica que en los meses invernales, el escurrimiento de la precipitación (en relación a las otras cuencas) a través de cauces es mayor que en las otras cuencas, elemento que se refleja en que el valor máximo de la densidad de irrigación se encuentra precisamente en la cuenca control.

Además, la mayor longitud de cauces tipo 1 se encuentran en las microcuencas 1, 2 y 3; siendo en la 4 donde alcanzan su mayor extensión. La red de cauces es fundamental para establecer el comportamiento hídrico de la microcuenca y por ende establecer los planes de restauración, ya que, es en los cauces donde se implementan obras como gaviones y en las laderas próximas a estos se colocan las obras que tienen como fin impedir la emisión de sedimento.



**Figura 7.47. Perfil longitudinal del cauce principal de la microcuencia 1.** La continuidad del perfil indica que el cauce principal presenta una continuidad a lo largo de su recorrido a través de la microcuencia lo que permite inferir su poder erosivo durante las temporadas invernales. Fuente: Elaboración propia.

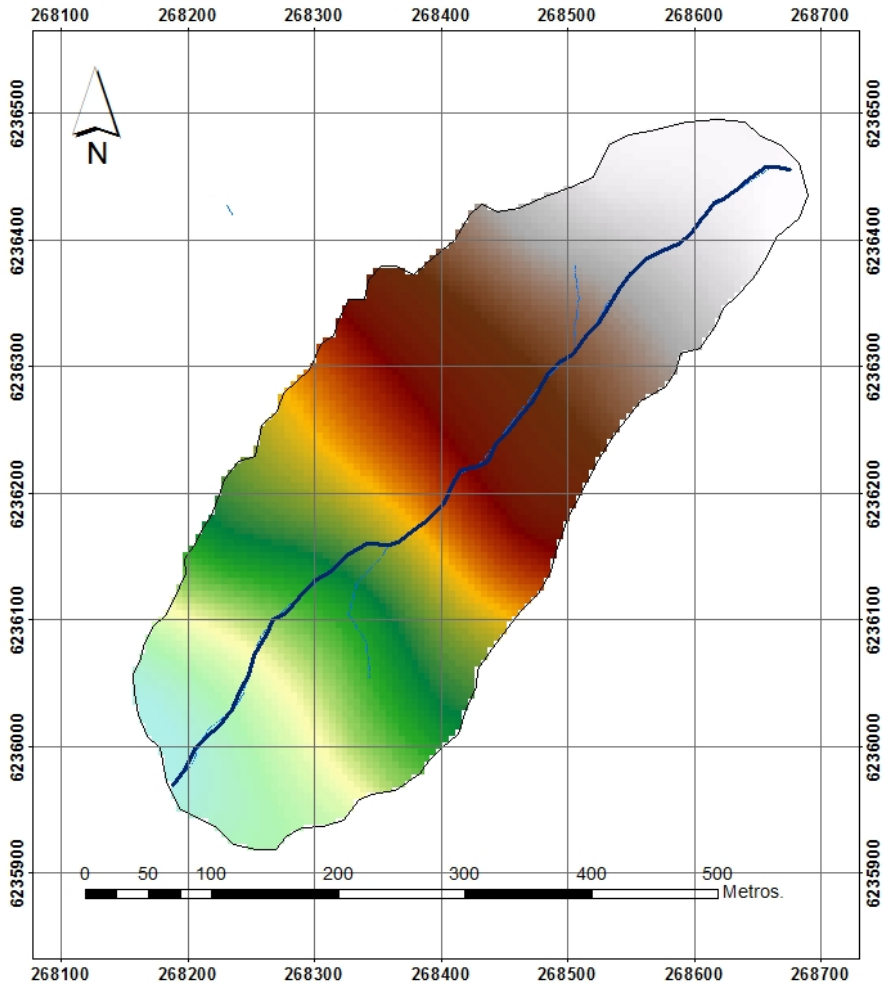


**Figura 7.48. Diseño lógico del sistema de drenaje de la microcuencia 1.** Los cauces o flujos (F) están esquematizados según un diseño de redes. Los nodos indican los puntos de conexión de los cauces y en superíndice (con rojo) el tipo de cauce según la clasificación de Horton. Fuente: Elaboración propia.

La esquematización o diseños lógicos de la red de cauces en las microcuencas establecen una globalidad en cuanto a la clasificación y distribución nodal en función de la conexión de cauces. El diseño sigue la correlación de la distribución de redes, definiéndose los flujos (F) y la numeración respectiva (asignándose con el valor 1 al cauce principal) por lo que cada cauce tiene su propia identificación.

Los nodos (identificados en la figura con el signo “+” son los puntos de unión de cauces lo que establece una sumatoria (+) de caudal, dando origen a otro cauce con un caudal mayor.

La clasificación de Horton para cada cauce está definida por el respectivo superíndice (en rojo); definiéndose el tipo de cauce, es decir, cauce principal y los tributarios. El número de nodos en la microcuencia 1 es solo de 2, lo que indica una baja irrigación en relación a las otras microcuencas. Lo anterior significa que el número de nodos es proporcional a la irrigación de la microcuencia,

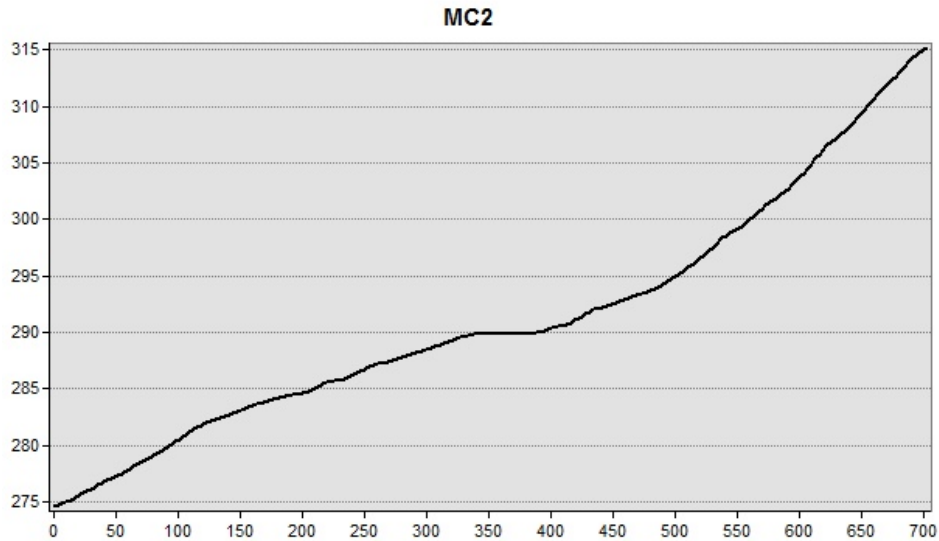


**Figura 7.49. Cauce principal de la microcuenca 1.** El cauce principal en esta microcuenca está orientado en dirección NE a SW casi sin sinuosidades a lo largo de su recorrido y en forma continua a través de la microcuenca lo que contribuye a su poder erosivo durante los eventos pluviométricos. Fuente. Elaboración propia.

La red de cauces en la microcuenca 1 es muy poca diversificada según lo indica el diseño lógico de la red hídrica de la microcuenca, básicamente solo es posible encontrar 2 puntos nodales en toda la superficie. Esto justifica la implementación de obras de restauración en conjunto con la reforestación para aumentar la disponibilidad de agua disminuyendo la escorrentía superficial.

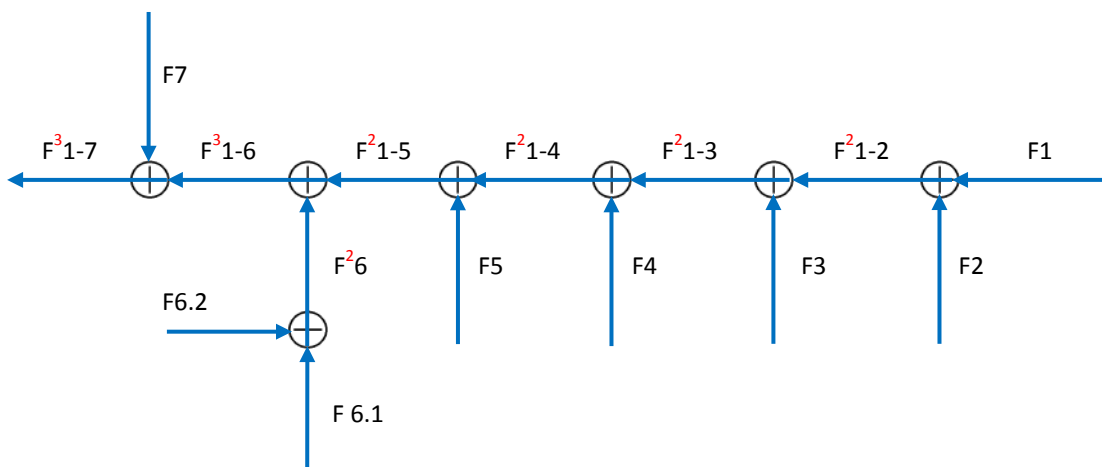
Dada además la forma del cauce principal que corre longitudinalmente en la microcuenca, hace evidente su poder erosivo durante los eventos pluviométricos, lo cual se acrecienta por la deforestación que se llevó a cabo en el lugar, aumentando con ello la escorrentía y la sedimentación.

En este tipo de microcuenca las lluvias tienen un impacto mayor en comparación a otras microcuenca cuya morfología y tipo de cauces hace que resistan más eficientemente los eventos climatológicos cuando han sufrido alteraciones de orden antrópico.



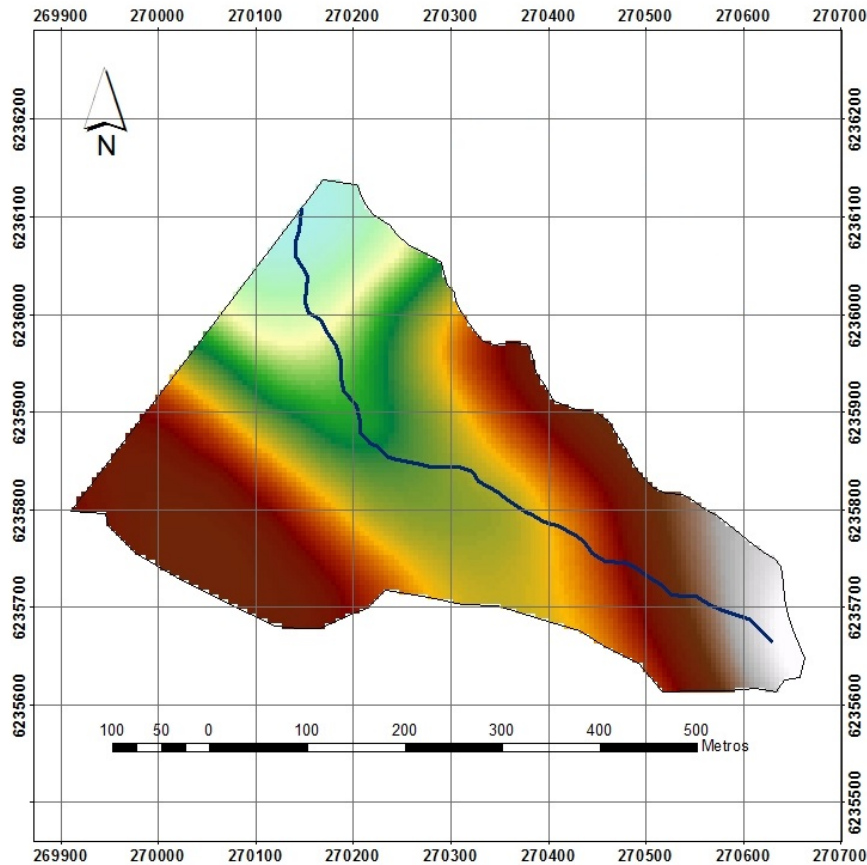
**Figura 7.50. Perfil longitudinal del cauce principal de la microcuenca 2.** En su inicio el cauce presenta una continuidad, disminuyendo posteriormente una altitud de 25 metros en solo 300 metros de extensión, sin embargo, presenta cierta estabilidad en la zona media prolongándose en forma continua hasta la cota más baja. Fuente. Elaboración propia.

El perfil del cauce de la microcuenca muestra claras diferencias en comparación al cauce de la microcuenca 1. Mientras este último implicaba un fuerte poder erosivo (dada la continuidad del perfil), en la microcuenca 2, el perfil indica un decrecimiento en la prolongación de la continuidad; a los 290 metros de altitud el cauce experimenta un leve descenso en la altitud manteniéndose en esta cota por aproximadamente 50 metros antes de alcanzar altitudes menores. Posterior a esta cota (290), el cauce experimenta nuevamente una continuidad sin sinuosidades que se prolonga hasta la cota más baja de la microcuenca.



**Figura 7.51. Diseño lógico del sistema de drenaje de la microcuenca 2.** La mayor presencia de nodos indica que la cuenca presenta una mayor irrigación, aunque [a diferencia de la anterior] predominan los cauces tipo 1 y aparecen cauces tipo 3. Fuente. Elaboración propia.

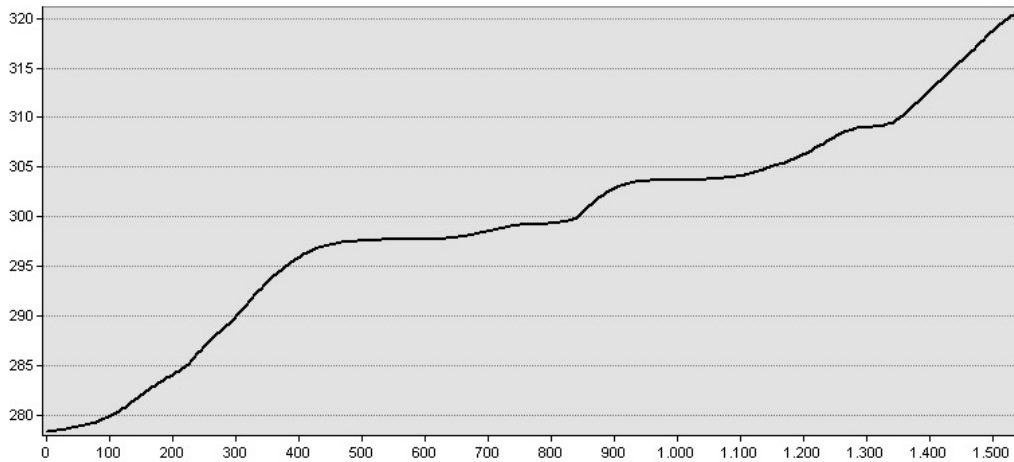
La red hídrica de la microcuenca 2 se caracteriza por tener una alta densidad nodal en comparación a la red de las microcuenca 1; lo cual implica que las precipitaciones tienen mayor probabilidad de encontrar un cauce primario para tributar a uno mayor. Esto implica una mayor irrigación de la microcuenca, dada la mayor cantidad de causas tipo 1, lo cual a su vez indica una alta torrencialidad en la cauce F<sup>3</sup>1-7. Esto contribuye en parte a la reforestación de la microcuenca debido a la mayor probabilidad que tiene el agua de las precipitaciones de encontrar un cauce, sin embargo, también contribuye a aumentar la pérdida de suelo cuando la microcuenca pierde su cobertura vegetal; efecto que ha disminuido en los últimos años producto de la intervención de restauración.



**Figura 7.52. Cauce principal de la microcuenca 2.** El cauce principal en esta microcuenca presenta dirección SE – NW, con pequeñas oscilaciones en la zona baja, tomando dirección norte en el sector más bajo. Casi no hay sinuosidades a lo largo de su recorrido, tomando los flujos que tributan desde ambas laderas que circunscriben la microcuenca. Fuente. Elaboración propia.

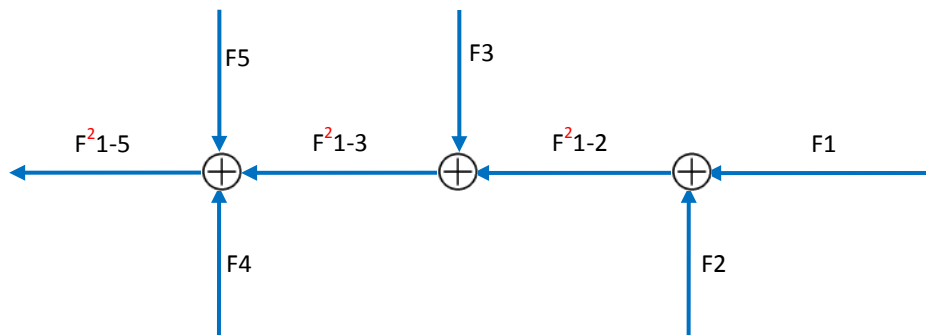
El cauce principal de la microcuenca se extiende desde una cota que va desde los 315 a los 275 metros que recorre en 700 metros. El cauce no presenta sinuosidades considerables durante su extensión, el cual se prolonga en dirección SE – NW, con pequeñas oscilaciones en la zona baja, tomando dirección norte en el sector más bajo. El cauce toma la red de tributarios que aportan los cauces de ambas laderas más la escorrentía que arrastra sedimento de los sectores más erosionados de la microcuenca.

### MC3



**Figura 7.53. Perfil longitudinal del cauce principal de la microcuenca 3.** El cauce de la microcuenca no presenta una continuidad a lo largo de su extensión, el perfil indica sinuosidades en su extensión entre las cotas 310 y 295. Fuente: Elaboración propia.

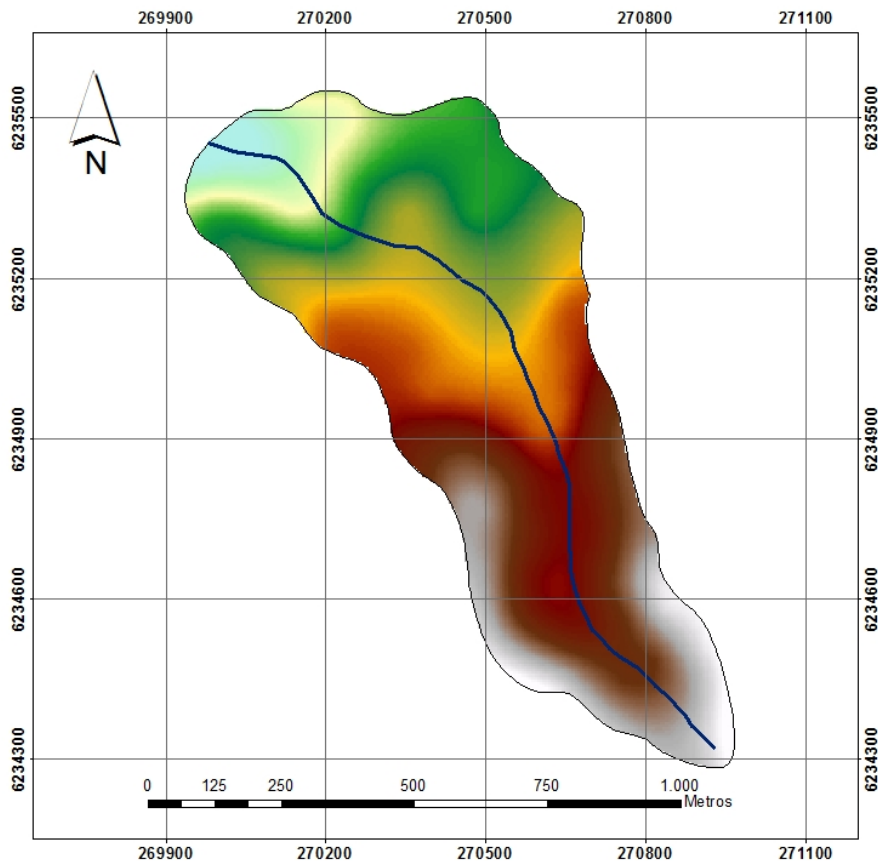
El cauce de la microcuenca 3 exhibe una longitud de 1570 metros entre las cotas 320 y 275. A lo largo de su recorrido presenta un perfil distinto al perfil longitudinal de cauce de las microcuencas 1 y 2. La diferencia fundamental implica que no existe una continuidad a lo largo de todas las cotas, por el contrario, en la cota 305 y 300 presenta cierta uniformidad en su recorrido no presentando pendientes pronunciadas, sino una continuidad solo en dichas cotas, retomando su descenso al final de su recorrido. La inferencia que exhibe el perfil indica un cauce de poco poder erosivo cuyas pendientes suaves a lo largo de su recorrido entre las cota 305 y 295 indica un socavamiento menor en comparación a las pendientes que están sobre y bajo las mencionadas cotas. Todo lo anterior permite describir un bajo socavamiento del cauce principal en comparación a la microcuenca 1. En cuanto a la red hídrica, la microcuenca 3 se caracteriza por su baja densidad nodal, lo que implica que es baja en número de tributarios y por lo tanto, presenta una red hídrica poco diversificada caracterizada principalmente por un cauce de gran extensión que atraviesa casi toda la microcuenca.



**Figura 7.54. Diseño lógico del sistema de drenaje de la microcuenca 3.** No hay presencia de cauces tipo 3 y predominan los cauces tipo 1. La irrigación es menor que en la microcuenca anterior, existiendo solo 3 nodos de conexión en los cuales se genera la sumatoria de los cauces. Fuente: Elaboración propia.

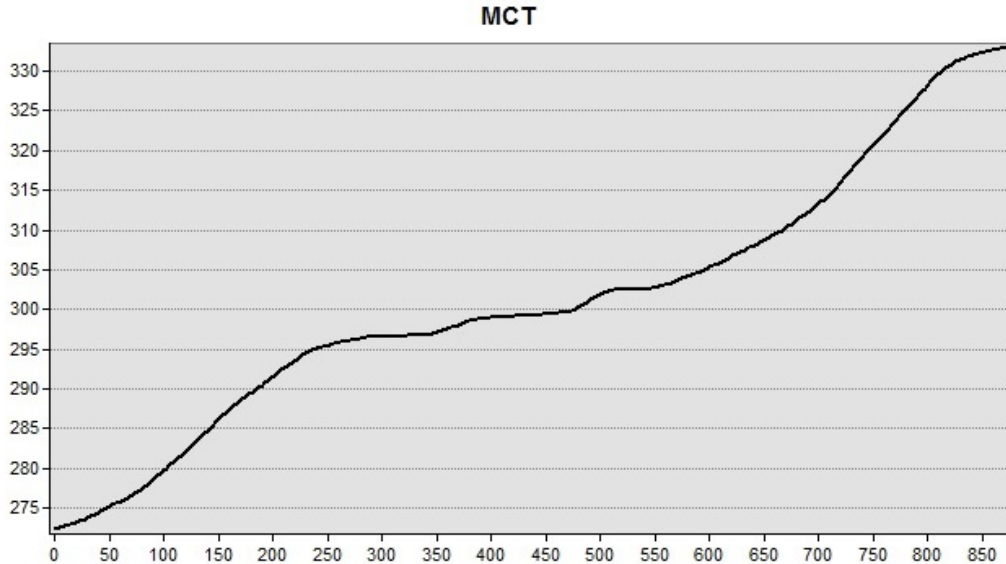
La baja diversificación de la red hídrica (que básicamente se circunscribe a unos pocos causes) ocasiona que –al igual que la microcuenca– exista una baja irrigación de la microcuenca que justifica la implementación de obras de restauración hidrológico – forestal para permitir al máximo la disponibilidad de agua. Ello conlleva además a que la gota de lluvia tenga pocas posibilidades de alcanzar un cauce ocasionando un aumento de la escorrentía y aumentando con ello la sedimentación.

Sumado a lo anterior, la baja irrigación y la conformación del perfil indican un cauce poco torrentoso en las temporadas invernales.



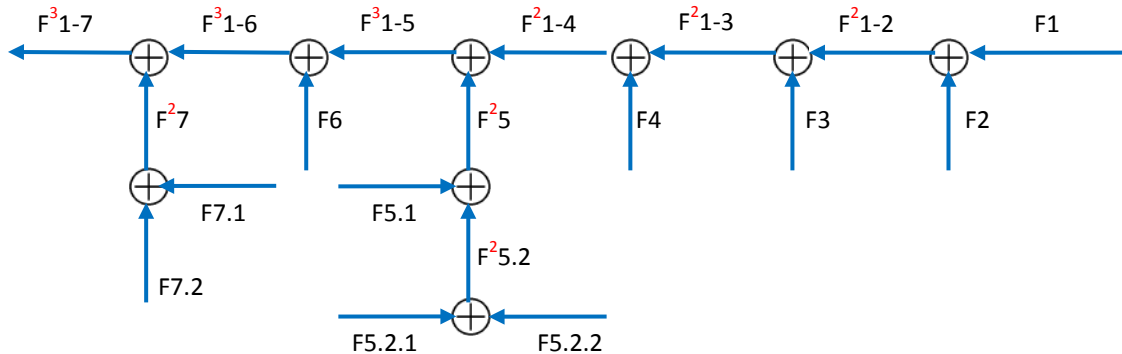
**Figura 7.55. Cauce principal de la microcuenca 3.** El cauce principal en esta microcuenca presenta dirección SE – NW. Casi no hay sinuosidades a lo largo de su recorrido, tomando los pocos tributarios que confluyen hacia él. Fuente. Elaboración propia.

El cauce principal de la microcuenca 3 fluctúa entre las cotas 320 y 275 con orientación SE – NW no presentando sinuosidades marcada a lo largo de su recorrido. Su orientación cambia levemente al norte durante su recorrido, retornando a su dirección original en su último tramo. Las obras de restauración hidrológica–forestal se localizan preferentemente en el último trayecto del cauce, lugar en el cual se implementó además gran parte de los procesos de reforestación. La estación de medición de caudal se instaló también en su último tramo.



**Figura 7.56. Perfil longitudinal del cauce principal de la microcuencia 4.** A diferencia de la microcuencia 1, el perfil del cauce de la microcuencia testigo (MCT) exhibe una débil concavidad entre las cotas 330 y 300 y una fase estacionaria hasta la cota 295 lo que indica la baja torrencialidad del cauce durante los meses invernales. Fuente. Elaboración propia.

El cauce principal de la microcuencia 4 fluctúa entre las cotas 330 y 270 con una longitud que supera levemente los 850 metros. Sin embargo no presenta una continuidad (como la que se observa en el perfil del cauce de la microcuencia 1) a lo largo de su trayecto. Exhibe una débil concavidad entre las cotas 330 y 300, que no resulta significativa en cuanto a la torrencialidad del cauce, sin embargo entre las cotas 300 y 295 presenta una fase estacionaria en una diferencia de cota de solo 5 metros, la cual se extiende por casi 300 metros, lo cual es significativo en cuanto a la torrencialidad en este tramo. Sin embargo, esta aumenta por bajo la cota 295 presentando una continuidad hasta su tramo final.

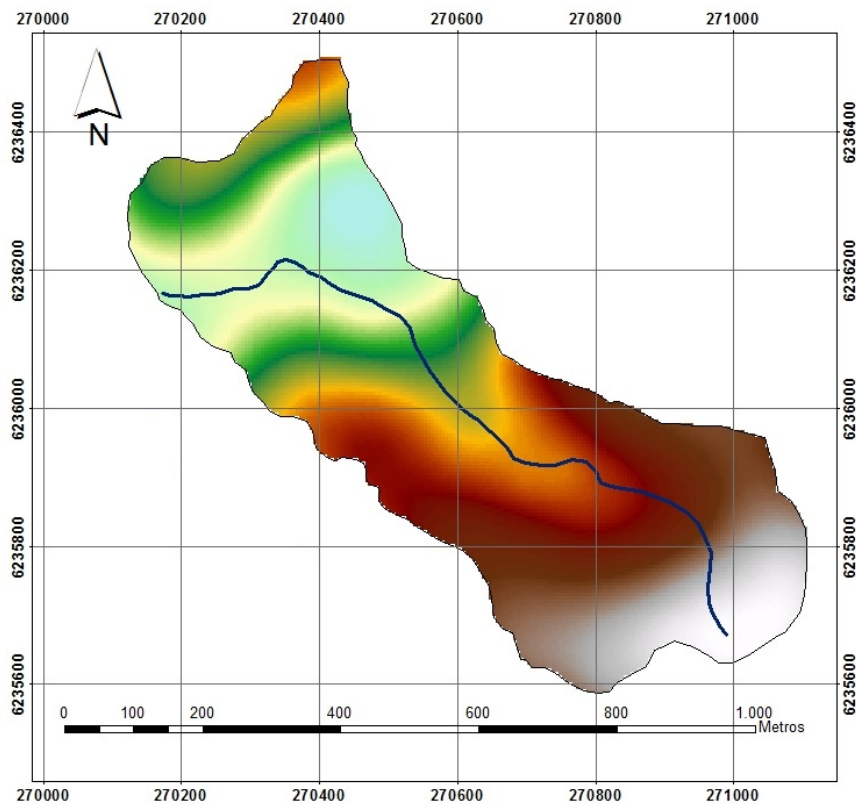


**Figura 7.57. Diseño lógico del sistema de drenaje de la microcuencia 4.** El drenaje de la microcuencia 4 considera cauces tipo 3 y se evidencia una cantidad mayor de cauces tipo 2 en comparación a las anteriores microcuencas, Esta última presenta la mayor cantidad de nodos lo que indica una mayor irrigación, esto último en terminos de drenaje, ya que, en este sector, gran parte de los cauces solo presentan caudal en la temporada invernal. Fuente: Elaboración propia



El modelo lógico indica básicamente un aumento en la frecuencia de nodos en comparación a las microcuencas 1 y 3. Este aumento implica que esta microcuenca presenta una mayor irrigación en su extensión, debido a la diversificación de su red hídrica por el aumento de tributarios.

La escorrentía solo se forma en invierno debido a la inexistencia de acuíferos o glaciares, por lo tanto, en esta temporada la escorrentía superficial ocasiona la formación de sedimentos hacia el cauce principal debido a que por ser microcuenca testigo, aquí no se implementó ninguna obra de restauración hidrológico – forestal por tanto los suelos están desprovistos de cubierta vegetal y son impactados por la gota de lluvia durante los eventos pluviométricos aumentando la escorrentía y la pérdida de suelos. La alta frecuencia nodal origina una mayor concentración del flujo en el cauce F<sup>3</sup>1-7, lo que genera un aumento de la escorrentía aumentando la socavación del cauce, debido a que la probabilidad del agua de alcanzar un cauce primario es mayor en comparación a las microcuencas 1 y 3.



**Figura 7.58. Cauce principal de la microcuenca 4.** El cauce principal en esta microcuenca presenta dirección SE – NW, presentando una continuidad con leves oscilaciones durante su trayecto para cambiar a dirección oeste en su último tramo. Fuente. Elaboración propia.

El cauce principal exhibe leves oscilaciones, sin embargo, no hay sinuosidades muy marcadas que permitan una disminución en el flujo superficial. Sin embargo, existe un cambio de dirección en el último tramo del cauce alterando su dirección hacia el oeste.

Los cauces son elementos constitutivos de primera importancia en una cuenca hidrográfica debido a que condicionan la distribución de las aguas en el interior de esta; por ello es importante delimitar las características de la red de cauces. En relación a la permanencia de los cauces en Alto Loica, estos no siempre están con agua durante todo el año debido a la inexistencia de acuíferos o glaciares que alimenten continuamente estos cauces. Generalmente, los cauces que están permanentemente con agua proceden de efluentes provenientes de la Cordillera de los Andes, en cambio, los cauces que nacen en la Cordillera de la Costa (como en el caso de Alto Loica) están con agua solo durante la época invernal, salvo excepciones constituidas por acuíferos que emanen a la superficie.

En Alto Loica los cauces se caracterizan por ser efímeros e interrumpidos, lo cual indica que solo están con agua en cierta época del año lo que condiciona las tareas de restauración y reforestación. Por ello las obras de restauración hidrológica – forestal tienen una importancia trascendental en la captación y concentración de agua en las temporadas invernales

Parámetro	Microcuencas			
	1	2	3	4
<b>Permanencia de caudales</b>	Efímero	Interrumpido	Interrumpido	Efímero
<b>Socavación del cauce principal</b>	Socavación de fondo y lateral	Socavación de fondo y lateral	Socavación de fondo y lateral	Erosión laminar
<b>Tiempo de concentración (hrs)</b>	0,13	0,15	0,34	0,19

**Tabla 7.64. Parámetros relativos a los cauces de las microcuencas.** Los cauces en las microcuencas son efímeros e interrumpidos lo cual denota una baja permanencia de los caudales generados en las épocas invernales. En relación a la socavación de los cauces principales de las microcuencas, el motivo de mayor recurrencia es la socavación de fondo y lateral. Fuente: Elaboración propia.

Los cauces de Alto Loica no presentan sinuosidades marcadas que permitan la concentración de agua, la disminución de la velocidad o la disminución del flujo en temporadas invernales lo cual contribuiría a la disminución del poder erosivo de los cauces. Esto se acrecienta debido a la inexistencia de una cubierta vegetal de gran envergadura que permita disminuir el impacto tanto de la gota de lluvia como de la escorrentía superficial.

Lo anterior, ocasiona que la socavación lateral y de fondo de los cauces sea un fenómeno aun existente en las microcuencas.

## 7.2.4. Análisis biológico

### 7.2.4.1. Bacterias

Los árboles liberan a través de sus raíces, exudados de composición química variada, los cuales cumplen una función importante en los ciclos naturales que se llevan a cabo en la rizósfera y en los suelos en general. Estos exudados son aprovechados por las bacterias y hongos como elementos nutritivos para su desarrollo y multiplicación, lo cual, produce importantes crecimientos bacterianos a nivel radicular generando un aumento considerable de la biomasa del suelo del orden de los  $10^3$  a  $10^4$  kg de masa microbiana por hectárea (Fierer, et al, 2007).

De las 15 muestras, solo 9 lograron niveles aceptables de medición, obteniéndose muestras de 54 genes de ARNr 16S, cuya similaridad se muestra en la siguiente tabla.

	1x	3x	5x	6x	7x	9x	12x	13x	14x
14x	52.385	60.982	36.250	61.331	61.744	63.350	80.620	72.478	
13x	55.013	63.623	42.357	56.332	57.020	57.916	76.525		
12x	57.471	63.227	42.481	63.654	61.322	60.311			
9x	48.218	58.758	36.706	73.710	79.280				
7x	51.907	62.965	37.461	69.597					
6x	53.151	53.606	44.912						
5x	66.167	51.673							
3x	64.157								
1x									

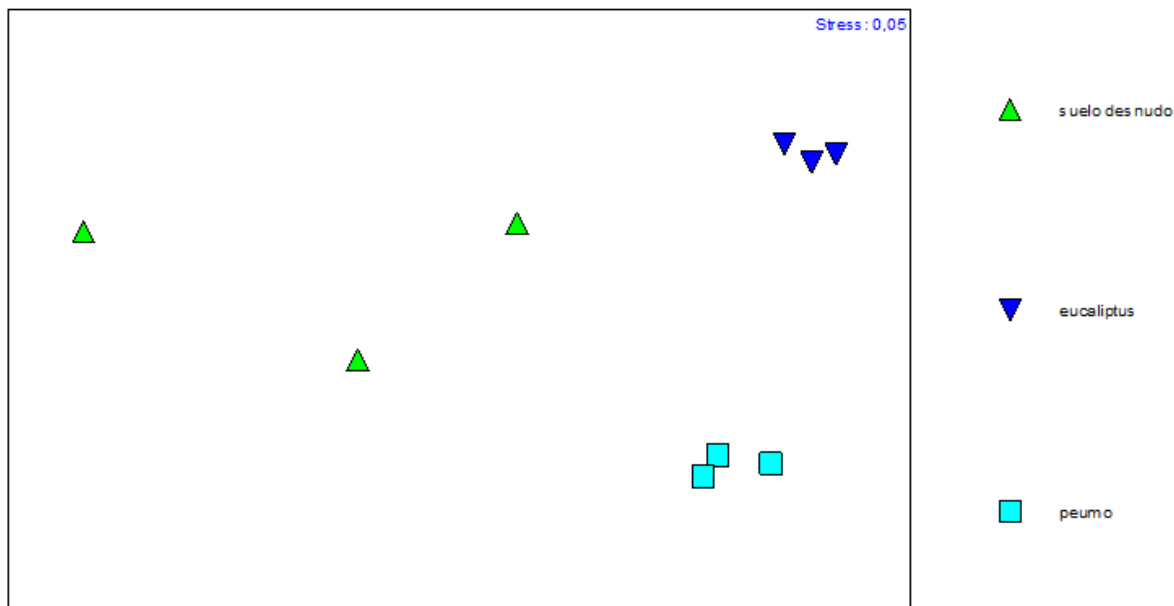
**Tabla 7.65. Matriz de similaridad bacteriana.** La tabla muestra la similaridad entre las comunidades bacterianas existentes en Alto Loica. Fuente: Elaboración propia.  
X : CAMSP1.fsa

En el estudio se logró la amplificación del ARNr 16S, obteniéndose solo comunidades y no especies bacterianas. La amplificación de los mencionados genes permitió establecer la variabilidad existente a nivel de comunidades bacterianas en los suelos de Alto Loica, sin distinguir las especies precisas que allí coexisten.

Los muestras de suelo tomadas de la zona de la rizósfera de peumo, eucaliptus y de suelo desnudo (erosionado), establecen que existe una selectividad en las poblaciones bacterianas que habitan en las raíces de estos árboles. Esto significa que las comunidades bacterianas existentes en las raíces de los eucaliptus son absolutamente distintas a las comunidades bacterianas existentes en la rizósfera de los peumos. Esta selección puede explicarse al hecho que estos árboles tienen elementos claramente diferenciadores. En primer lugar, el eucaliptus es un árbol exótico<sup>102</sup>, mientras que el peumo es un árbol nativo; esto significa que el peumo ha evolucionado durante miles de años adaptándose a las distintas variables existentes en la zona, lo cual, ha conllevado a

<sup>102</sup> De origen australiano, fue introducido en Chile en el siglo XIX por el industrial Tomas de Urmeneta como elemento esencial para la minería del cobre.

una evolución paralela de las especies microbianas existentes en los suelos. Una de los elementos claves para la adaptación bacteriana han sido los exudados radiculares liberados por este árbol. Esto permite inferir que estos [exudados], difieren ampliamente de los exudados radiculares del eucaliptus, ya que, este último pertenece a un ambiente ecológicamente distinto.



**Figura 7.59. NMSD de bacterias.** Las comunidades bacterianas exhiben gran similaridad cuando crecen en el mismo medio, sin embargo, son absolutamente diferentes cuando el medio de crecimiento es distinto. En este caso las comunidades bacterianas que crecen en la rizósfera de los eucaliptus, peumos y suelo desnudo (erosionado) son absolutamente diferentes. Fuente: Elaboración propia.

Además, el metabolismo de ambos arboles difiere en muchos aspectos. En primer lugar el eucaliptus absorbe mayor cantidad de agua y presenta una evapotranspiración mayor que cualquier árbol nativo (Huber, et al, 2010). Esto implica que las condiciones ecosistémicas a nivel radicular cambian ampliamente de una especie a otra.

ASPECTO	VALOR
Prueba estadística ("R" global)	0,835
Nivel de significancia de la prueba estadística	0,4 %
Numero de permutaciones	280
Numero de permutaciones estadísticas más grandes que o equivalentes al global R: 0	1

**Tabla 7.66. Test global para bacterias.** La tabla indica los valores para el test global de las bacterias indicando el "R" global y aspectos como el nivel de significancia y el número de permutaciones para la prueba estadística. Fuente: Elaboración propia.

Otro aspecto diferenciador lo constituyen las comunidades bacterianas existentes en el suelo desnudo (o erosionado). Las comunidades que se localizan en el suelo erosionado difieren de las comunidades que se localizan en las raíces de los árboles; esto debido a que ciertas especies son más dependientes a ciertas condiciones ecológicas existentes en la rizósfera de los árboles. Se deduce por lo tanto que las poblaciones existentes en los suelos erosionados son comunidades más resistentes a condiciones de baja disponibilidad de nutrientes.

Grupos	R Estadístico	Nivel de significancia (%)	Permutaciones posibles	Permutaciones actuales	Números >= observados
Sd / Eu	0,815	10	10	10	1
Sd / Pm	0,778	10	10	10	1
Eu / Pm	1,000	10	10	10	1

**Tabla 7.67. Test de relación para bacterias.** Se indica el nivel de relación entre los distintos tipos de comunidades bacterianas existentes en los suelos de Alto Loica. La tabla relaciona las comunidades que se localizan en el suelo con peumo, con eucaliptus y suelo desnudo. El “R estadístico” relaciona la similitud entre los grupos encontrándose una mayor diferenciación entre las especies localizadas en la rizósfera del peumo y eucaliptus que cualquiera de estos con el suelo desnudo. Fuente: Elaboración propia.

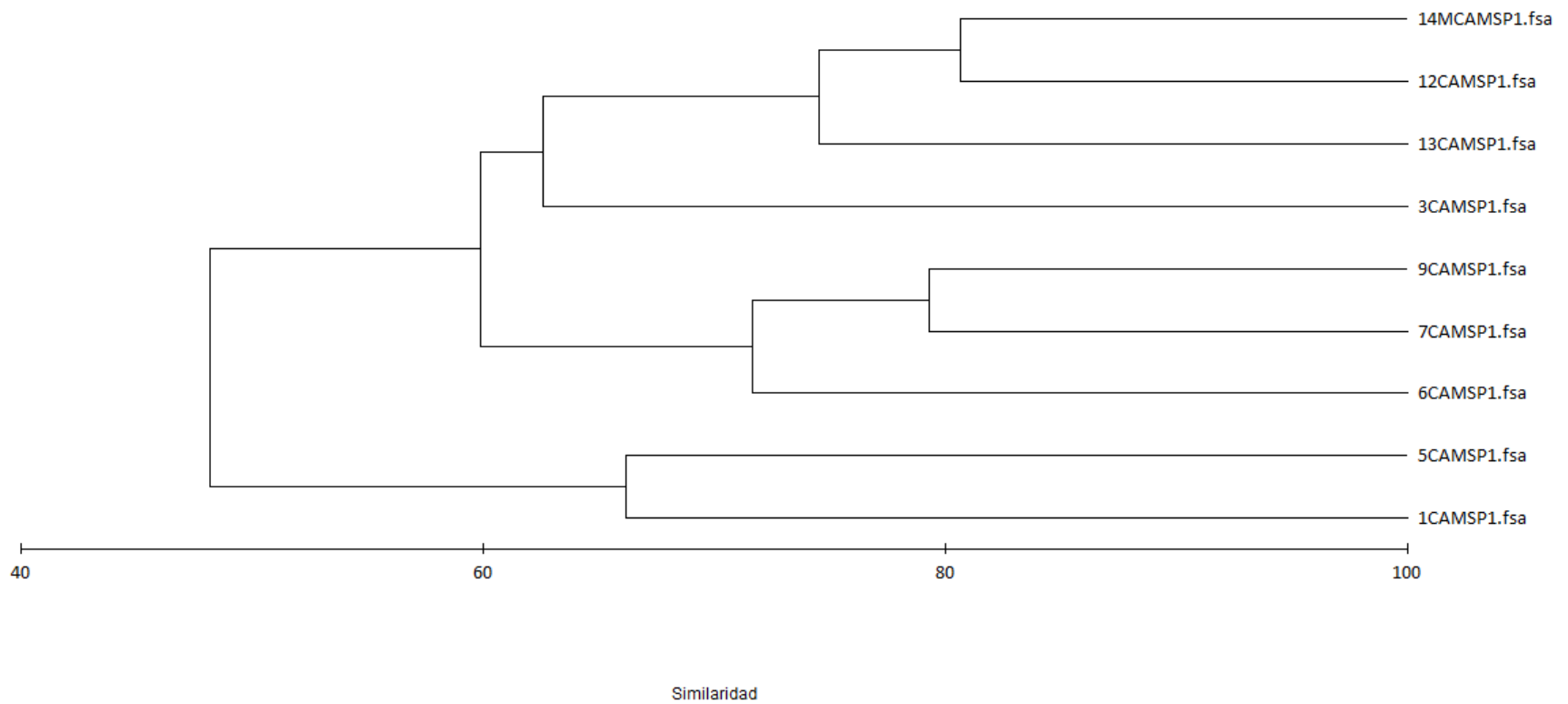
Eu : Eucaliptus

Sd : Suelo desnudo (erosionado)

Pm: Peumo

La correlación existente entre las comunidades de diferentes especies arbóreas queda de manifiesto con el “R estadístico”<sup>103</sup>. Al relacionar las comunidades de suelo desnudo y peumo se observa que estas [comunidades] presentan un alto grado de diferenciación, al igual que el suelo desnudo asociado con eucaliptus, lo cual indica que algunas de las bacterias coexisten en ambos medios, estableciendo la diferencia aquellos microorganismos con un alto grado de tolerancia a la baja disponibilidad de nutrientes y humedad. En cambio, al relacionar las comunidades existentes en suelo con peumo y con eucaliptus, este factor toma un valor de 1, lo cual indica una diferenciación máxima entre las 2 comunidades microbianas. Esto clarifica lo expresado en el NMDS bacteriano: las comunidades bacterianas de suelos con árboles exóticos y nativos presentan un grado de variabilidad y selectividad mayor que las comunidades bacterianas existentes en suelo erosionado, ya que estas, solo se han diferenciado por su capacidad de tolerancia a condiciones adversas, mientras que las otras (peumo y eucaliptus) han sido sometidas a un proceso de selección propia de la diferenciación metabólica existente a nivel radicular expresada en la diferenciación química de sus exudados.

<sup>103</sup> Este valor expresa el grado de diferenciación entre dos comunidades, tomado un valor de 0 cuando las comunidades son iguales y 1 cuando las comunidades son absolutamente diferentes. Los valores medios indican el grado de relación en el siguiente orden: 0 – 0,5 diferenciación poco significativa; 0,5 – 0,7: diferenciación significativa; 0,7 – 1,0: diferenciación altamente significativa.



**Figura 7.60. Dendrograma de las comunidades microbianas de los suelos de Alto Loica.** La figura indica el grado de variabilidad genómica existente entre las comunidades bacterianas de los suelos de Alto Loica. Las muestras que tienen un punto en común corresponden a comunidades bacterianas similares; lo que se establece mediante la similitud entre las secuencias nucleotídicas de los ARNr 16S. Las 9 muestras presentan una alta diversidad, lo cual se visualiza en la bifurcación del árbol dendrográfico. Fuente: Elaboración propia.

El análisis de las comunidades bacterianas identificó 548 genes de ARNr 16S, sin embargo solo 54 genes resultaron significativos para análisis. Tal como se indica en el dendograma, los genes presentan secuencias nucleotídicas que son comunes y ciertos segmentos que presentan secuencias diferenciadoras, las cuales, establecen la diferencia entre una especie bacteriana y otra al momento de comparar estos segmentos con los bancos o bibliotecas genómicas dispuestas para estos ensayos.

Este hecho es clave para determinar la mayor o menor abundancia de ciertas comunidades, lo cual, puede establecerse por el aporte de ciertos segmentos en relación al total. En el estudio, las especies se connotan con el gen asociado a un correlativo tal como se expresan en las 3 tablas que se presentan a continuación.

Cabe consignar que en los 3 ambientes distintos (suelo desnudo, con eucaliptus y con peumo) hay un segmento que es común y que es el que aporta con un peso mayor al promedio de abundancia. La especie 92<sup>104</sup>, es común a todos los ambientes por lo que se infiere que presenta la capacidad de adaptarse a todos los exudados y a ambientes con una baja disponibilidad de agua y nutrientes, sin embargo, cabe considerar que independiente de la abundancia el elemento a considerar es la riqueza. Tanto en suelo erosionado como en suelo con eucaliptus, esta especie aporta con un valor superior al 60 % de abundancia y su aporte es sobre el 50 % en el suelo de peumo. Además, la riqueza es menor en el suelo erosionado y mayor (casi similar) en los otros 2 casos. Esto último puede atribuirse a la disminución de recursos debido a la falta de nutrientes orgánicos y exudados por la ausencia de individuos vegetales. La abundancia de microorganismos en los medios radicales es esencial para la mineralización de sustancias orgánicas y para los ciclos biogeoquímicos, por ello, una mayor riqueza y abundancia constituyen dos elementos fundamentales para los ciclos bacterianos, entre los que destacan la acción de los protistas sobre las comunidades bacterianas contribuyendo al ciclo ecológico de la rizósfera.

Espece	Promedio de abundancia	Promedio de similaridad	Similaridad Sd	Contribución (%)
92	66.12	26.41	3.33	43.54
100	4.12	6.08	7.46	10.02
152	3.53	5.77	5.77	9.52
55	5.95	4.91	2.01	8.09
161	1.80	4.13	7.42	6.81
146	1.50	3.84	6.91	6.33
153	1.63	1.49	0,58	2.46
503	1.68	1.41	0.58	2.33
155	2.03	1.35	0.58	2.23

**Tabla 7.68. Porcentajes de similaridad y contribución de cada especie en suelo erosionado.** Promedio de similaridad: 60.67. Fuente: Elaboración propia.

<sup>104</sup> Tal como se indicó, el numero corresponde solo al número de la muestra (en este caso una secuencia) y por lo tanto indica una especie bacteriana.

Especie	Promedio de abundancia	Promedio de similitud	Similitud Sd	Contribución (%)
92	62.72	20.94	10.11	28.22
151	3.56	4.97	7.43	6.69
153	3.52	4.88	8.64	6.58
163	2.35	4.06	15.81	5.47
94	2.46	3.94	5.45	5.32
131	2.06	3.76	9.78	5.07
171	1.84	3.68	9.55	4.96
55	1.79	3.48	10.08	4.69
142	1.68	3.45	15.57	4.64
161	1.90	3.24	30.52	4.37
65	1.59	3.18	7.13	4.28
154	1.42	2.91	8.32	3.92
489	1.51	2.63	2.90	3.55
404	1.39	1.11	0.58	1.50
488	1.68	1.08	0.58	1.45

**Tabla 7.69. Porcentajes de similitud y contribución de cada especie en suelo con eucaliptus.** Promedio de similitud: 74.20. Fuente: Elaboración propia.

Especie	Promedio de abundancia	Promedio de similitud	Similitud Sd	Contribución (%)
92	51.30	18.93	9.32	24.73
153	6.82	6.98	20.17	9.12
265	4.07	5.11	22.51	6.68
152	3.91	5.08	10.56	6.63
142	4.11	4.67	8.27	6.10
94	4.20	4.15	3.30	5.43
100	3.32	4.13	23.36	5.40
163	2.54	3.92	20.11	5.12
131	2.62	3.81	5.67	4.98
161	2.18	3.17	16.57	4.14
171	1.43	3.13	24.08	4.09
54	1.57	3.09	18.05	4.04
65	1.45	2.93	6.20	3.83

**Tabla 7.70. Porcentajes de similitud y contribución de cada especie en suelo con peumo.** Promedio de similitud: 76.54. Fuente: Elaboración propia.



#### 7.2.4.2. Hongos

A diferencia del análisis anterior relativo a las bacterias, en el caso de los hongos las 15 muestras resultaron ser significativas encontrando muestras de ARN 16S en condiciones de ser analizadas. De esta forma, se detectaron 161 genes o muestras viables de ser consideradas en el estudio.

Aunque los hongos están limitados debido a su dependencia de humedad y materia orgánica debido a su metabolismo (Solomon, et al, 1998), muestran una gran variabilidad en suelos forestales. El análisis demostró que –al igual que en bacterias– la variabilidad a nivel de comunidades que habitan en la rizósfera de los árboles difieren cuando se trata de diferentes especies arbóreas. Este hecho se explica por la selectividad originada por la diversidad química de los exudados radiculares, los cuales, determinan y seleccionan comunidades de microorganismos adaptables a un medio determinado.

Para el caso en estudio, las muestras obtenidas en el suelo de peumo, muestran comunidades absolutamente distintas a las comunidades encontradas en el suelo con eucaliptus. A nivel de hongos la diferencia cuantitativa a nivel de comunidades es similar a las diferencias encontradas a nivel bacteriano; esto significa que al igual que las bacterias, también los hongos sufren un proceso de selectividad al crecer y multiplicarse en medios radiculares distintos, lo cual, confirma el hecho que los ambientes radiculares de especies arbóreas diferentes forman medios metabólicamente distintos que afectan no solo a las bacterias sino también a los hongos.

Otro elemento a considerar es el hecho que los microorganismos son limitados por los elementos químicos del suelo, sea como sustancias necesarias para su metabolismo o como limitantes del crecimiento.

Al igual que en las bacterias, el NMDS muestra dos aspectos básicos:

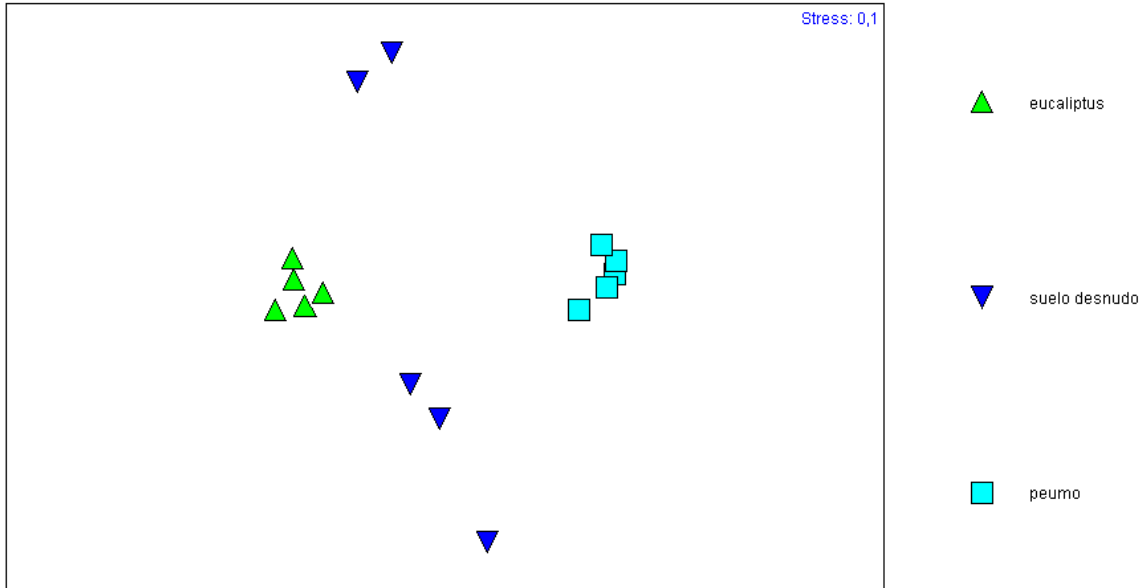
a) Existe una alta variabilidad cuantitativamente significativa entre los hongos existentes en la rizósfera de peumos y eucaliptus, lo cual, conlleva a que los exudados radiculares no solo generan una selectividad de las poblaciones microbianas, sino también, seleccionan las comunidades de hongos existentes en dicho lugar. Aunque poseen una alta tasa metabólica y un alto potencial mineralizador (Solomon, et al, 1998), la composición química de las secreciones radiculares produce un microecosistema que altera las comunidades fúngicas seleccionando aquellas capaces de adaptarse a determinadas condiciones químicas del entorno radicular;

b) Se observa una mayor biodiversidad y menor selección de comunidades en los hongos que habitan el suelo erosionado. Estos hongos a su vez son más similares con los que habitan en los suelos con peumo y eucaliptus; esta característica puede explicarse por el hecho que la falta de capa vegetal en los suelos erosionados genera una menor selección de comunidades edáficas y presenta una mayor homogeneidad por no estar afectada por los exudados radiculares de las especies arbóreas mencionadas; aunque, su número puede ser relativamente menor por el hecho de estar sometidos a la falta de nutrientes orgánicos y disminución de agua debido a la baja retención de esta por la eliminación de la capa vegetal

	1x	2x	3x	4x	5x	6x	7x	8x	9x	10x	11x	12x	13x	14x	15x
15x	25.263	25.124	28.717	30.333	32.064	30.768	23.643	17.210	25.455	30.064	58.375	67.537	58.825	60.791	
14x	22.971	22.608	26.041	25.656	28.896	32.179	20.902	24.780	23.460	29.571	68.102	74.582	65.888		
13x	24.735	22.575	26.236	21.121	27.016	33.619	21.332	20.433	23.954	33.133	63.693	66.273			
12x	28.030	21.213	26.640	27.399	28.477	31.552	19.062	29.724	17.669	27.957	81.985				
11x	28.758	24.579	32.400	25.599	29.904	45.356	19.306	35.582	18.133	37.221					
10x	32.308	35.810	45.424	33.635	36.863	53.166	32.214	33.881	31.027						
9x	26.484	34.572	30.426	27.196	28.960	24.163	55.668	16.034							
8x	29.016	21.283	27.834	17.854	24.725	50.065	15.044								
7x	27.887	36.914	34.744	32.814	30.967	28.151									
6x	32.125	33.608	43.847	32.800	33.445										
5x	56.778	55.127	65.294	60.199											
4x	54.117	62.562	65.045												
3x	64.017	73.950													
2x	63.731														
1x															

**Tabla 7.71. Matriz de similitud de hongos.** La tabla indica la similitud de los hongos existentes en los suelos de Alto Loica los cuales crecen en los 3 medios señalados en el apartado anterior. Fuente: Elaboración propia.

X : CAHINF1.fsa



**Figura 7.61. NMDS de hongos.** Las comunidades de hongos que crecen en suelos con peumo y eucaliptus presentan una gran variabilidad entre si, en cambio, su variabilidad disminuye con las poblaciones que se encuentran en los suelos erosionados. Fuente: Elaboración propia.

En la figura puede observarse la alta diferenciación de las comunidades de hongos existentes en las rizósferas de peumos y eucaliptus. Aunque no se determinaron especies de hongos específicas para cada caso, la variabilidad de las especies que crecen en el suelo con peumos es absolutamente distinta a las comunidades de hongos existentes en los suelos con eucaliptus. Sin embargo, en los suelos erosionados (con azul) puede observarse una mayor diversidad entre si y mucho más cercanas a los otros dos anteriores. En esto se presume que las comunidades de hongos tienden a ser homogéneas en el suelo, pero incide directamente el lugar y especie arbórea específica que da el hábitat a las comunidades fúngicas.

ASPECTO	VALOR
Prueba estadística ("R" global)	0,737
Nivel de significancia de la prueba estadística	0,1 %
Numero de permutaciones	999
Numero de permutaciones estadísticas más grandes que o equivalentes al global R: 0	0

**Tabla 7.72. Test global para hongos.** La tabla muestra los valores de la prueba estadística y el nivel de significancia para las comunidades de hongos en los suelos de Alto Loica. Fuente: Elaboración propia.

Grupos	R Estadístico	Nivel de significancia (%)	Permutaciones posibles	Permutaciones actuales	Números >= observados
Eu / Sd	0,50	0,8	126	126	1
Eu / Pm	1,00	0,8	126	126	1
Sd / Pm	0,64	0,8	126	126	1

**Tabla 7.73. Test de relación para hongos.** La diversidad para los hongos es alta cuando estos crecen en ambientes distintos, en este caso, en suelo con peumos y suelo con eucaliptus. En cambio, la variabilidad no es altamente significativa cuando estos medios se comparan con las comunidades que habitan en suelos erosionados (ver “R” estadístico). Fuente: Elaboración propia.

Eu : Eucaliptus

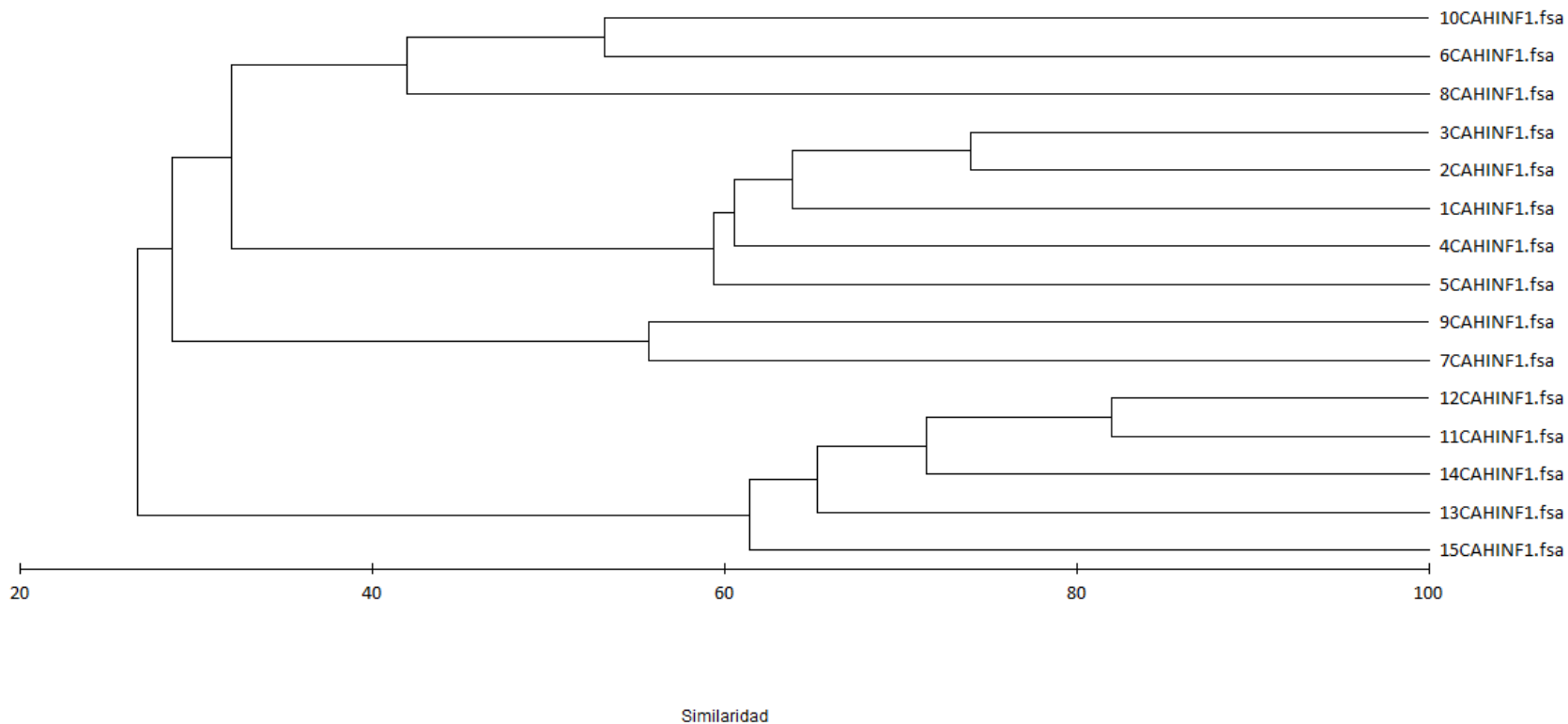
Sd : Suelo desnudo (erosionado)

Pm: Peumo

El “R estadístico” obtenido para el análisis de la biodiversidad comunitaria fúngica en los suelos muestra una relación significativa entre las especies seleccionadas en diversos ambientes. Al comparar las comunidades existentes en suelos erosionados y suelos con eucaliptus, el valor para el “R estadístico” es de 0,50; lo cual implica que la diferenciación no es altamente significativa, e indica que ciertas especies de hongos son comunes en estos dos ambientes mientras que otros claramente seleccionados no aparecen en los suelos que han perdido la capa vegetal. De esta misma forma al comparar cuantitativamente las comunidades de suelos erosionados pero esta vez con hongos provenientes de suelos con peumo, el valor cambia a 0,64, lo cual es un claro indicador que la diferenciación entre dos medios es mucho mayor y menor el grado de similitud entre estos dos medios. Claramente, esto significa que las comunidades de hongos encontrados en los suelos erosionados tienen similitud con los hongos encontrados en suelos con peumos y eucaliptus; la similitud puede deberse a compartir un suelo con aspectos similares y la diferencia en este caso estaría dada por la falta de agua y nutrientes en los suelos erosionados lo cual haría cambiar la similitud de comunidad de hongos en estos medios.

Sin embargo, el análisis de las comunidades encontradas en suelos con peumo y eucaliptus indica una diferenciación altamente significativa cuyo valor alcanza el máximo (1). Este valor indica que las comunidades de ambos sitios son absolutamente distintas, lo cual, implica que la selectividad de la rizósfera de ambos medios actúa alterando las comunidades de hongos seleccionando aquellos que son más aptos o se adecúan a las condiciones químicas de los exudados radiculares.

La diferenciación encontrada en los medios de distintos arboles –en este caso un árbol nativo y un árbol exótico– claramente establecen diferencias significativas a nivel radicular que son apreciables tanto en hongos como en bacterias, lo cual, significa que gran parte de los microorganismos del suelo son afectados y seleccionados por los exudados radiculares, lo que genera diferencias microbiológicas en los suelos forestales con una gran biodiversidad arbórea.



**Figura 7.62. Dendrograma de las comunidades de hongos de los suelos de Alto Loica.** La figura indica el grado de variabilidad genómica existente entre las comunidades de hongos de los suelos de Alto Loica. Al igual que en las bacterias, la variabilidad está determinada por la presencia de diversos genes diferenciados por segmentos que contienen secuencias nucleotídicas específicas en los genes de ARN 16S. Las 15 muestras presentan una alta diversidad, lo cual se visualiza en la bifurcación del árbol dendrográfico que a su vez presenta mayores ramificaciones que el dendrograma bacteriano. Fuente: Elaboración propia.

Especie	Promedio de abundancia	Promedio de similaridad	Similaridad Sd	Contribución (%)
98	42.61	15.74	6.98	25.35
282	6.94	6.09	8.07	9.81
312	6.08	5.40	7.50	8.70
283	4.62	5.04	6.50	8.11
58	5.25	5.02	7.47	8.09
259	2.94	3.89	9.04	6.26
313	3.12	3.68	6.12	5.93
256	3.52	3.62	2.63	5.83
81	2.28	2.90	2.57	4.67
77	2.73	1.64	0.93	2.64
307	0.83	1.33	1.11	2.14
63	0.73	1.17	1.10	1.89
113	0.67	1.15	1.11	1.85

**Tabla 7.74. Porcentajes de similaridad y contribución de cada especie en suelo con eucaliptus.** Con un promedio de similaridad: 62,08; se observa que solo una especie aporta la mayor parte de la abundancia con un valor sobre el 40 %. Fuente: Elaboración propia.

El análisis hecho en el dendograma otorga una perspectiva acerca de la variabilidad genética de las comunidades encontradas; la gran variabilidad y segmentación encontradas en las 15 muestras (en las cuales casi todas en el dendograma tienen diferencias nodales), indica el gran nivel de diferenciación a nivel del ARN 16S lo cual es un indicador de las diferencias a nivel de especies que es posible encontrar en los suelos de Alto Loica.

Por otra parte en los suelos con eucaliptus se observa que solo una especie contribuye con un 25 % a la biodiversidad total y a diferencias de las bacterias, es posible encontrar un mayor número de especies, siendo una (en este caso la 98) la que se presenta con mayor claridad. Otro aspecto a considerar es que esta misma especie es la que aporta con una mayor contribución en suelo erosionado lo que claramente indica que es la especie más abundante en los suelos forestales de las microcuencas en estudio. En este último caso, esta especie aporta con más del 62 % del total en este suelo con lo que se infiere que este aumento se explica por el hecho que esta especie es más abundante en suelos erosionados por no estar sometida a la selectividad que se encuentra en la rizósfera de los eucaliptus.

Finalmente en los suelos con peumos los análisis indicaron la existencia de una menor cantidad de especies y por ende una mayor selectividad por parte de la rizósfera del peumo con los hongos, ya que, se encontraron solo 6 especies y ninguna de ellas alcanza un aporte del 50 %, cosa que no ocurre en los casos anteriores. Esto tipifica en hecho que la selectividad del peumo (al menos con los hongos) es mayor debido al hecho que hay menos especies y la más abundante no logra llegar a los aportes que si se encuentran en los suelos mencionados anteriormente.

<b>Especie</b>	<b>Promedio de abundancia</b>	<b>Promedio de similitud</b>	<b>Similitud Sd</b>	<b>Contribución (%)</b>
98	60.34	21.33	1.55	62.83
58	2.50	2.34	1.08	6.90
228	7.98	1.38	0.61	4.07
265	0.89	1.37	1.08	4.02
258	0.65	1.19	0.79	3.51
267	0.80	0.96	1.02	2.83
256	2.35	0.80	0.56	2.37
81	1.05	0.46	0.62	1.35
286	0.58	0.45	0.61	1.34
128	2.00	0.29	0.32	0.86

**Tabla 7.75. Porcentajes de similitud y contribución de cada especie en suelo desnudo.** Con un promedio de similitud: 33.94 se observa que solo una especie aporta la mayor parte de la abundancia con un valor del 60 %. Fuente: Elaboración propia.

<b>Especie</b>	<b>Promedio de abundancia</b>	<b>Promedio de similitud</b>	<b>Similitud Sd</b>	<b>Contribución (%)</b>
98	35.29	17.63	5.89	26.45
287	18.30	12.93	4.88	19.40
361	15.33	10.91	9.50	16.38
359	10.77	9.63	3.91	14.45
58	4.81	6.11	7.13	9.17
157	2.73	2.99	1.12	4.49

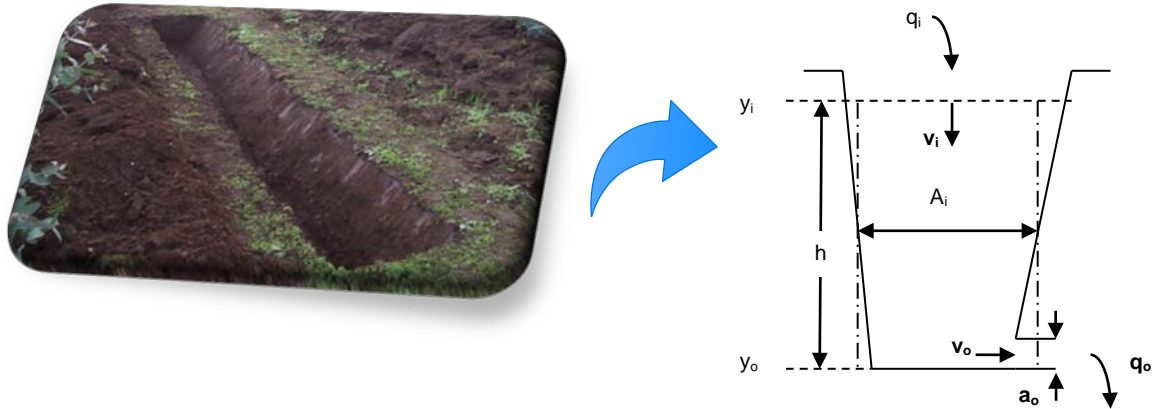
**Tabla 7.76. Porcentajes de similitud y contribución de cada especie en suelo con peumo.** Con un promedio de similitud: 66.63, se observa una comunidad más homogénea en la cual no se encuentran los niveles de las tablas anteriores. Fuente: Elaboración propia.

### 7.3. MODELACION ANALITICA EMPIRICA DE ZANJAS DE INFILTRACION

#### 7.3.1. Modelación DENL-BB para Zanjas de Infiltración.

##### 7.3.1.1. Introducción

Se propone un modelo diferencial-empírico, que se conceptualiza a partir de relaciones pragmáticas no lineales (NL) propias de la zanja y la siguiente representación estructural simplificada (Fig. 7.54), utilizable conceptualmente en el diseño de modelos.



**Figura 7.63. Representación conceptual simplificada de zanja.** La figura indica la representación estructural de una zanja de infiltración. Fuente. Elaboración propia.

Los principales variables y parámetros considerados para el diseño de modelos de zanja  $z_j$ , se expresan a continuación:

L: Largo de zanja

$y_1$ : Altura superior del nivel de zanja,  $y_0$ : Altura inferior de escurrimiento de flujo

h: altura diferencial efectiva del nivel de líquidos en la zanja

$w_1$ : Ancho superior de la zanja,  $w_0$ : Ancho inferior de la zanja

$A_i$ : Área basal promedio de cada zanja,  $A_i = L \cdot (w_1 - w_0) / 2$

$a_o$ : Área promedio de infiltración más escurrimiento en la zanja

h: Altura diferencial efectiva de la zanja,  $h = y_1 - y_0$

$g, \rho$ : Cte. de gravedad y parámetro densidad en la zanja.

$v_i, v_o$ : Velocidades flujos de entrada y salida de zanja

$q_i, q_o$ : Flujos de entrada y salida de zanja  $z_j$

En la formulación inicial, se relaciona variables y parámetros típicos para una zanja  $z_j$  de infiltración, considerando la variación del volumen de componentes de fluido al interior de dicha zanja, asociando flujo total de entrada  $q_{z_j,i}$ , un área promedio de zanja  $A_{z_j}$ , y flujo total de salida  $q_{z_j,o}$  sobre un área  $a_{z_j,o}$ . En este contexto, la ecuación de balance de flujos de zanja se expresa inicialmente como:

$$q_{z_j,i} = \frac{d(A_{z_j,i} \cdot h_{z_j})}{dt} + q_{z_j,o} \quad (1)$$



donde  $h_{zj}$  es la altura efectiva del nivel de fluido en la zanja, y donde el flujo de salida  $q_{zj.o}$  se formula en (2), bajo el acondicionamiento de incluir componentes de evaporación, evapotranspiración, infiltración y escorrentía, los últimos dos, fluyendo sobre un área con representación concentrada  $a_{zj.o}$ .

$$q_{zj.o} = a_{zj.o} v_{zj.o} + q_{zj.Ev_0} \quad (2)$$

Bajo acondicionamiento de diferencias despreciables entre densidades y presiones medibles en puntos de entrada y salida para los flujos de interés, y definiendo acondicionamiento inicial  $v_{zj.o}^2 \gg v_{zj.i}^2$ , se obtiene una representación aproximada para el flujo total de salida de zanja  $q_{zj.o}$ , el que asocia a su área  $a_{zj.o}$ , una composición de área de flujo de infiltración  $a_{zjIn.o}$  más un área de flujo de escorrentía  $a_{zjEs.o}$ , lo que se expresa implícitamente en (3):

$$q_{zj.o} = a_{zj.o} \sqrt{2gh_{zj}} + q_{zj.Ev_0} \quad (3)$$

### 7.3.1.2. Especificación de variables explícitas e implícitas de la modelación

La denominación detallada de variables, conformación de flujos y volúmenes de zanja considerados en el desarrollo inicial, es la siguiente:

$$\begin{aligned} q_{zj.i} &= Q_i \text{ escorrentía} + Q_i \text{ precipitación} + Q_i \text{ infiltración por gravedad} \\ &= Q_{zj.Es.i} + Q_{zj.P.i} + Q_{zj.In.i} \\ q_{zj.o} &= Q_o \text{ escorrentía} + Q_o \text{ infiltración} + Q_o \text{ evaporación} + Q_o \text{ evapotranspiración;} \\ &= Q_{zj.Es.o} + Q_{zj.In.o} + Q_{zj.Ev.o} + Q_{zj.Evt.o} \\ Q_{zj.o} \text{ infiltración} &= (Q_o \text{ Inf later-anterior} + Q_o \text{ Inf later-posterior} + Q_o \text{ Inf later-izq} + Q_o \text{ Inf later-derecho}) + Q_o \text{ Inf basal} \\ q_{zj.oIn} &= Q_{zj.In.la.o} + Q_{zj.In.lp.o} + Q_{zj.In.li.o} + Q_{zj.In.ld.o} + Q_{zj.In.ld.ba.o} \\ q_{zj.Ev0} &= Q_o \text{ evaporación} + Q_o \text{ evapotranspiración} \\ &= Q_{zj.Ev.o} + Q_{zj.Evt.o} \end{aligned}$$

$A_{zj.i} h_{zj.i}$ : Volumen efectivo de fluido en la zanja  $zj$

$\frac{dA_{zj.i} \cdot h}{dt}$ : Variación volumen del fluido al interior de la zanja  $zj$ .

### 7.3.2. Modelo dinámico NL de altura de nivel de zanja

Desarrollando (1) se obtiene la sig. ecuación (4), que representa un modelo aproximado para la altura diferencial efectiva del nivel de fluido al interior de cada zanja, y donde  $q_{zj.i}$  incluye componentes de precipitación, escorrentía y de potencial infiltración:

$$\frac{dh_{zj}}{dt} + \frac{a_{zj.o} \sqrt{2g}}{A_{zj.i}} \sqrt{h_{zj}} + q_{zj.Ev_0} = \frac{1}{A_{zj.i}} q_{zj.i} \quad (4)$$

### 7.3.3. Modelo dinámico NL de flujos de salida de zanja

La representación para la variable flujo de salida  $q_{zj,o}$ , considera (4) bajo el acondicionamiento que el flujo de evaporación más evapotranspiración representan una fracción  $k_{zj,Ev0}$  del flujo total de salida de zanja, y se modela como:

$$q_{zj,0} \cdot \frac{dq_{zj,0}}{dt} + k_{zj,0} q_{zj,0} = k_{zj,0} \cdot q_{zj,i} \quad (5)$$

donde:

$$q_{zj,Ev0} = k_{zj,Ev0} \cdot q_{zj,0} \rightarrow q_{zj,0} = \frac{a_{zj,0j}}{1 - k_{zj,Ev0}} \cdot \sqrt{2gh_{zj}} \leftrightarrow h_{zj} = \frac{q_{zj,0}^2 \cdot (1 - k_{zj,Ev0})^2}{2g \cdot a_{zj,0}^2} = \frac{q_{zj,0}^2}{k_{zj,0}} \quad (6)$$

$$k_{zj,0} = \frac{a_{zj,0}^2 g}{A_{zj,i} \cdot (1 - k_{zj,Ev0})^2} \quad (7)$$

### 7.3.4. Modelo dinámico linealizado de flujo salida de zanja

Las expresiones (4) y (5) poseen estructura NL, lo que en este desarrollo es resuelto y aproximado, usando método de linealización truncada de Taylor. Aplicando este acondicionamiento sobre una de las expresiones (6), la relación de altura linealizada en función del flujo de salida, para un punto de operación pragmático  $(q_{zj,0}^*, h_{zj,0}^*)$ , quedando expresada por:

$$h_{zj,0}(q_0) = h_{zj,0}^* + \frac{2 \cdot q_{zj,0}^*}{k_{zj,0}} (q_{zj,0} - q_{zj,0}^*) \quad (7)$$

donde  $(q_{zj,0}^*, h_{zj,0}^*)$  es definible en el diseño de cada zanja Zj. Reemplazando (7) en (1) y ordenando, se obtiene la expresión aproximada (8), que representa la variación dinámica del flujo de salida de zanja:

$$\dot{q}_{zj,0} + k_{zj,*} \cdot q_{zj,0} = k_{zj,*} \cdot q_{zj,i}, \quad k_{zj,*} = \frac{k_{zj,0}}{2A_{zj,i} \cdot q_{zj,0}^*} \quad (8)$$

Usando representación equivalente de Laplace (Martin, 2000) para la expresión (8), el flujo de salida se obtiene como:

$$q_{zj,0}(s) = \frac{k_{zj,*}}{s + k_{zj,*}} \cdot q_{zj,i}(s) \quad (9)$$

y la expresión de respuesta dinámica para el flujo de salida de zanja en el dominio del tiempo  $q_{zj,0}(t)$ , corresponderá a la siguiente transformada inversa de Laplace aplicada a (9):

$$q_{zj,0}(t) = L^{-1}\{q_{zj,0}(s)\} \quad (10)$$

### 7.3.5. Modelo dinámico linealizado de altura de nivel de zanja

Despejando  $q_{zj,0}$  de expresión (7) y reemplazando en (1), se obtiene la ecuación diferencial linealizada siguiente, que modela la altura efectiva  $h_{zj}$  de líquido para cada zanja  $Z_j$ .

$$\dot{h}_{zj} + k_{zj,*} \cdot h_{zj} + k_{zj,*} \cdot \left( \frac{2 \cdot q_{zj,0}^*}{k_{zj,0}} - h_{zj,0}^* \right) = \frac{2q_{zj,0}^* \cdot k_{zj,*}}{k_{zj,0}} \cdot q_{zj,i} \quad (11)$$

$$\text{donde: } k_{zj,*} = \frac{k_{zj,0}}{2A_{zj,i} \cdot q_{zj,0}^*}; \quad k_{zj,0} = \frac{a_{zj,0}^2 g}{A_{zj,i} \cdot (1 - k_{zj,Ev0})^2}$$

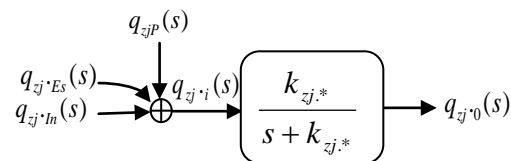
En similar forma, aplicando transformada de Laplace a (11), usando anti-transformada se obtiene  $h_{zj}(t) = L^{-1}(h_{zj}(s))$ . Se observa que las expresiones (8,11) corresponden a modelos *DENL-BB* linealizados en puntos de operación  $(q_{zj,0}^*, h_{zj,0}^*)$  definibles por criterios de diseño para cada zanja. Ambos representan modelos equivalentes asociables a cada estructura y set de parámetros de zanja, lo que permite simulación y experimentación simplificada, para representar e investigar optimizaciones a nivel del diseño de zanjas autónomas de infiltración.

### 7.3.6. Modelo Dinámico de flujos para un sistema de n Zanjas de Infiltración en Modalidad escalera.

#### 7.3.6.1. Antecedentes

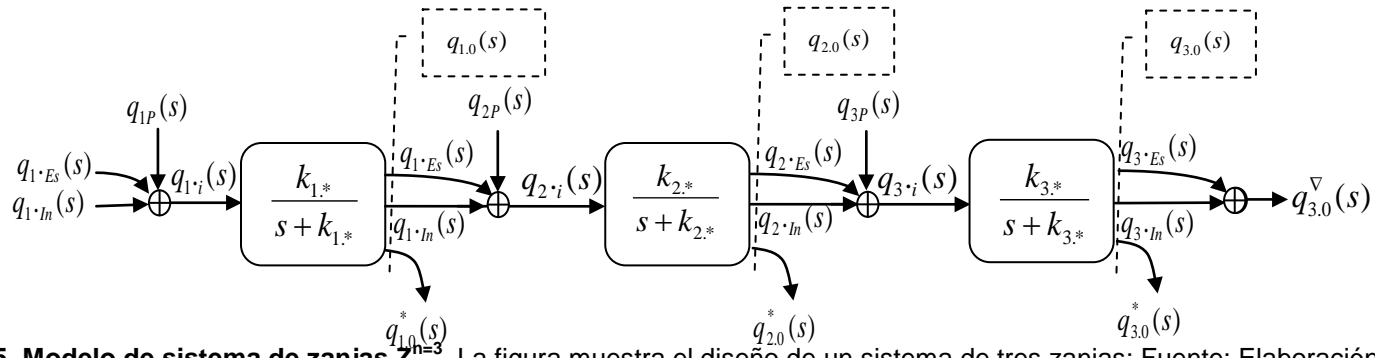
El desarrollo siguiente presenta un modelo para un sistema de  $n=3$  zanjas de infiltración en cascada ( $Z^{n=3}$ ), el cual se formula utilizando el modelo *DENL-BB* linealizado de flujo  $q_{zj,0}$ , desarrollado en la sección anterior.

La Fig. 7.64 representa el modelo (8) a nivel de diagrama normalizado de bloques en el dominio de variables de Laplace (Martin, 2000), para una zanja  $Z_j$ , el cual se utiliza en el siguiente desarrollo.



**Figura.7.64. Modelo normalizado de zanja en dominio de Laplace.** Fuente. Elaboración propia.

El modelo de bloques Fig.7.65 representa el diseño de un sistema de tres zanjas, dispuestas en modalidad escalera:



**Fig.7.65. Modelo de sistema de zanjas  $Z^{n=3}$ .** La figura muestra el diseño de un sistema de tres zanjas: Fuente: Elaboración propia

Las relaciones de flujos de entradas y salidas de zanja quedan expresadas como sigue:

$$q_{1.0}^*(s) = q_{1 \cdot Es}(s) + q_{1 \cdot In}(s) = q_{1.0}(s) - q_{1 \cdot Ev0}(s) \rightarrow q_{1 \cdot Ev0}(s) = q_{1 \cdot Ev}(s) + q_{1 \cdot EvI}(s)$$

$$\leftrightarrow q_{1.0}(s) = q_{1.0}^\nabla(s) + q_{1.0}^*(s)$$

$$q_{2.0}^*(s) = q_{2 \cdot Es}(s) + q_{2 \cdot In}(s) = q_{2.0}(s) - q_{2 \cdot Ev0}(s) \rightarrow q_{2 \cdot Ev0}(s) = q_{2 \cdot Ev}(s) + q_{2 \cdot EvI}(s)$$

$$\leftrightarrow q_{2.0}(s) = q_{2.0}^\nabla(s) + q_{2.0}^*(s)$$

$$q_{3.0}^*(s) = q_{3 \cdot Es}(s) + q_{3 \cdot In}(s) = q_{3.0}(s) - q_{3 \cdot Ev0}(s) \rightarrow q_{3 \cdot Ev0}(s) = q_{3 \cdot Ev}(s) + q_{3 \cdot EvI}(s)$$

$$\leftrightarrow q_{3.0}(s) = q_{3.0}^\nabla(s) + q_{3.0}^*(s)$$

### 7.3.6.2. Modelo dinámico de flujos salida Zanja1 para sistema $Z^{n=3}$

En el siguiente desarrollo, el modelo dinámico de flujo  $q_{1.0}$  del sistema de zanjas, queda representado por la expresión (12)

$$q_{1.0}(s) = q_{1.0}^\nabla(s) + q_{1.0}^*(s) = \frac{k_{1*}}{s + k_{1*}} \cdot q_{1.i}, \quad k_{1*} = \frac{k_{1.0}}{2A_{1.i} \cdot q_{0.1}^*}$$

$$q_{1.0}^\nabla(s) = \frac{k_{1*}}{s + k_{1*}} \cdot q_{1.i} - q_{1.0}^*(s)$$

$$\dot{q}_{1.0}^{\nabla} + k_{1*} \cdot q_{1.0}^{\nabla} + \dot{q}_{1.0}^* + k_{1*} \cdot q_{1.0}^* = k_{1*} \cdot q_{1.i},$$

$$\dot{q}_{1.0} + k_{1*} \cdot q_{1.0} = k_{1*} \cdot q_{1.i}, \quad (12)$$

donde:  $k_{1*} = \frac{k_{1.0}}{2A_{1.i} \cdot q_{0.1}^*}$

### 7.3.6.3. Modelo dinámico de flujos salida Zanja2 para sistema $Z^{n=3}$

En el siguiente desarrollo, a partir de (13), el modelo dinámico de flujo  $q_{2.0}$  del sistema de zanjas, queda representado por la expresión (14)

$$q_{2.0}^{\nabla}(s) + q_{2.0}^*(s) = \frac{k_{2*}}{s + k_{2*}} \cdot [q_{1.0}^{\nabla} + q_{2P}] \quad (13)$$

$$(\ddot{q}_{2.0} + (k_{1*} + k_{2*}) \cdot \dot{q}_{2.0} + k_{1*} \cdot k_{2*} \cdot q_{2.0}) + (k_{2*} \cdot \dot{q}_{1.0}^* + k_{1*} \cdot k_{2*} \cdot q_{1.0}^*) - (k_{2*} \cdot \dot{q}_{2P} + k_{1*} \cdot k_{2*} \cdot q_{2P}) = k_{1*} \cdot k_{2*} \cdot q_{1.i} \quad (14)$$

donde:  $k_{1*} = \frac{k_{1.0}}{2A_{1.i} \cdot q_{0.1}^*}$      $k_{2*} = \frac{k_{2.0}}{2A_{2.i} \cdot q_{0.2}^*}$

### 7.3.6.4. Modelo dinámico de flujos salida Zanja2 para sistema $Z^{n=3}$

En el siguiente desarrollo, a partir de (15), el modelo dinámico de flujo  $q_{3.0}$  del sistema de zanjas, queda representado por la expresión (17)

$$q_{3.0}^{\nabla}(s) + q_{3.0}^*(s) = \frac{k_{3*}}{s + k_{3*}} \cdot [q_{2.0}^{\nabla} + q_{3P}] \quad (15)$$

$$(\ddot{q}_{3.0} + (k_{1*} + k_{2*} + k_{3*}) \cdot \dot{q}_{3.0} + (k_{1*} \cdot k_{2*} + k_{1*} \cdot k_{3*} + k_{2*} \cdot k_{3*}) \cdot q_{3.0} + (k_{1*} \cdot k_{2*} \cdot k_{3*}) \cdot q_{3.0} + \dots$$

$$- (k_{2*} \cdot k_{3*} \cdot \dot{q}_{2P} + k_{1*} \cdot k_{2*} \cdot k_{3*} \cdot q_{2P}) + (k_{2*} \cdot k_{3*} \cdot \dot{q}_{1.0}^* + k_{1*} \cdot k_{2*} \cdot k_{3*} \cdot q_{1.0}^*) + \dots$$

$$-(k_{3,*} \cdot \ddot{q}_{3P} + (k_{1,*} + k_{2,*}) \cdot k_{3,*} \cdot \dot{q}_{3P} + k_{1,*} \cdot k_{2,*} \cdot k_{3,*} \cdot q_{3P}) + (k_{3,*} \ddot{q}_{2,0}^* + (k_{1,*} + k_{2,*}) \cdot k_{3,*} \cdot \dot{q}_{2,0}^* + k_{1,*} \cdot k_{2,*} \cdot k_{3,*} \cdot q_{2,0}^*) \dots \quad (16)$$

$$\text{donde: } k_{1,*} = \frac{k_{1,0}}{2A_{1,i} \cdot q_{0,1}} \quad k_{2,*} = \frac{k_{2,0}}{2A_{2,i} \cdot q_{0,2}} \quad k_{3,*} = \frac{k_{3,0}}{2A_{3,i} \cdot q_{0,3}}$$

$$= k_{1,*} \cdot k_{2,*} \cdot k_{3,*} \cdot q_{1,i}$$

Dando forma más compacta a la expresión (16) se tiene finalmente:

$$\begin{aligned} &(\ddot{q}_{3,0} + K_{30,2} \cdot \ddot{q}_{3,0} + K_{30,1} \cdot \dot{q}_{3,0} + K_{30,0} \cdot q_{3,0}) - (K_{2P,1} \cdot \dot{q}_{2P} + K_{2P,0} \cdot q_{2P}) + (K_{10,1} \cdot \dot{q}_{1,0}^* + K_{10,0} \cdot q_{1,0}^*) + \dots \\ &-(K_{3P,2} \cdot \ddot{q}_{3P} + K_{3P,1} \cdot \dot{q}_{3P} + K_{3P,0} \cdot q_{3P}) + (K_{20,2} \cdot \ddot{q}_{2,0}^* + K_{20,1} \cdot \dot{q}_{2,0}^* + K_{20,0} \cdot q_{2,0}^*) = K_{1i,0} \cdot q_{1,i} \end{aligned} \quad (17)$$

donde:

$$K_{30,2} = k_{1,*} + k_{2,*} + k_{3,*}$$

$$K_{30,1} = k_{1,*} \cdot k_{2,*} + k_{1,*} \cdot k_{3,*} + k_{2,*} \cdot k_{3,*}$$

$$K_{30,0} = k_{1,*} \cdot k_{2,*} \cdot k_{3,*}$$

$$K_{2P,1} = k_{2,*} \cdot k_{3,*}$$

$$K_{2P,0} = k_{1,*} \cdot k_{2,*} \cdot k_{3,*}$$

$$K_{10,1} = k_{2,*} \cdot k_{3,*}$$

$$K_{10,0} = k_{1,*} \cdot k_{2,*} \cdot k_{3,*}$$

$$K_{3P,2} = k_{3,*}$$

$$K_{3P,1} = (k_{1,*} + k_{2,*}) \cdot k_{3,*}$$

$$K_{3P,0} = k_{1,*} \cdot k_{2,*} \cdot k_{3,*}$$

$$K_{20,2} = k_{3,*}$$

$$K_{20,1} = (k_{1,*} + k_{2,*}) \cdot k_{3,*}$$

$$K_{20,0} = k_{1,*} \cdot k_{2,*}$$

$$K_{1i,0} = k_{1,*} \cdot k_{2,*} \cdot k_{3,*}$$

### 7.3.6.5. Modelo Dinámico de Variables de Estado (MVE) aplicado a Sistemas de Zanjas de Infiltración.

#### a) Antecedentes

Un MVE permite simular y resolver ecuaciones diferenciales de orden "n", utilizando sistemas matriciales de ecuaciones diferenciales compuestas por "n" variables de estado y "n" ecuaciones diferenciales de primer orden. Este tipo de modelación se propone para facilitar la simulación, resolver e investigar el diseño de sistemas de zanjas  $Z^n$  de infiltración para " $n \geq 3$ " etapas.

En este estudio la modelación se plantea conceptualmente a partir de la formulación de modelos aplicados de Kalman no estocástico (Haykin, 2001; Welch and Bishop, 2002). La estructura global de un modelo diferencial en variables de estado en el dominio del tiempo (MVEt) (Domínguez, et al, 2006; Gupta, 1966), se presenta a continuación.

$$\begin{cases} \dot{\bar{x}}(t) = A \cdot \bar{x}(t) + B \cdot \bar{q}_i(t) \\ \bar{q}_o(t) = C^T \cdot \bar{x}(t) + D \cdot \bar{q}_i(t) \end{cases} \quad (17)$$

La definición de componentes y operadores del modelo, se resume como sigue:

$A = A_{n \times n}$ ,  $B = B_{n \times q}$ ,  $C^T = C_{p \times n}^T$ ,  $D = D_{p \times q}$ : Matrices de parámetros del MVE.

$X = \bar{x}(t)_{n \times 1}$ : Vector de variables de estado.

$\bar{q}_i(t)_{q \times 1}$ : Vector de entradas.

$\bar{q}_o(t)_{p \times 1}$ : Vector de salidas

$D = \frac{d(\_)}{dt}$ : Representación matemática de operador diferencial (Ej:  $D^3 q_0(t) = \ddot{q}_0(t)$ )

#### b) Modelo dinámico MVEt $\ddot{q}_{3,0}$

Aplicando MVEt a la modelación de zanja3, focalizado el estado de salida de flujo  $q_{3,0}$  y estados internos de zanja, se define para  $n=3$ , el vector de variables de estado  $\bar{x} = [x_0, x_1, x_2]^T$  y se desarrolla MVEt a partir de (17), obteniéndose la expresión de modelo normalizado siguiente, así como también la correspondiente identificación y asignación de matrices de parámetros A, B, C, D del modelo MVE- $\ddot{q}_{3,0}$ , lo que se realiza en base a la siguiente especificación de variables de estado (*fuentes propias*):

$$x_0 = q_{3,0} \quad (18)$$

$$x_1 = \dot{x}_0 + K_{30,2} \cdot q_{3,0} - K_{3P,2} \cdot q_{3P} + K_{20,2} \cdot q_{2,0} \quad (19)$$

$$x_2 = \dot{x}_1 + K_{30,1} \cdot q_{3,0} - K_{2P,1} \cdot q_{2P} + K_{10,1} \cdot q_{10} - K_{3P,1} \cdot q_{3P} + K_{20,1} \cdot q_{20i} \quad (20)$$

de donde

$$\dot{x}_2 = -(K_{30.0} \cdot q_{3.0} + K_{10.0} \cdot q_{10} - K_{2P.0} \cdot q_{2.P} + K_{20.0} \cdot q_{2.0} - K_{1i.0} \cdot q_{1i}) \quad (21)$$

Construyendo MVEt a partir del modelo (17) y definiciones (18,19,20), se obtiene  $q_{3.0} = x_0$ , y se construye  $\dot{\vec{x}}(t) = A \cdot \vec{x}(t) + B \cdot \vec{q}_i(t)$ , definida como:

$$\begin{aligned} \dot{x}_0 &= x_1 - K_{30.2} \cdot x_0 + K_{3P.2} \cdot q_{3P} - K_{20.2} \cdot q_{2.0} \\ \dot{x}_1 &= x_2 - K_{30.1} \cdot x_0 + K_{2P.1} \cdot q_{2P} - K_{10.1} \cdot q_{10} + K_{3P.1} \cdot q_{3P} - K_{20.1} \cdot q_{2.0} \\ \dot{x}_2 &= -K_{30.0} \cdot x_0 - K_{10.0} \cdot q_{10} + K_{2P.0} \cdot q_{2.P} - K_{20.0} \cdot q_{2.0} + K_{1i.0} \cdot q_{1i} \end{aligned} \quad (22)$$

El modelo final se resuelve en base a la expresión (17) y (22), obteniéndose la definición de parámetros, para las matrices A, B, C, D del modelo MVE- $\ddot{q}_{3.0}$ . Integrando parámetros y conformando el MVEt con indexación n=3 variables de estado, q=5 entradas, y p=1 salida genérica de flujo para zanja3, se obtiene:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_0 \\ \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -K_{30.2} & 1 & 0 \\ -K_{30.1} & 1 & 0 \\ -K_{30.0} & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -K_{20.2} & 0 & K_{3P.2} & 0 \\ -K_{10.1} & -K_{20.1} & K_{3P.1} & K_{3P.1} & 0 \\ -K_{10.0} & -K_{20.0} & K_{2P.0} & 0 & K_{1i.0} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} q_{10} \\ q_{20} \\ q_{2P} \\ q_{3P} \\ q_{1i} \end{bmatrix} \\ [q_{3.0}] &= [1 \quad 0 \quad 0] \cdot \begin{bmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (23)$$

Considerando la estructura compacta definido en expresión (17), se obtiene el MVE- $\ddot{q}_{3.0}$  siguiente:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_0 \\ \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -a_{11} & 1 & 0 \\ -a_{21} & 1 & 0 \\ -a_{31} & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & b_{12} & 0 & b_{14} & 0 \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} & 0 \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & 0 & b_{35} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} q_{10} \\ q_{20} \\ q_{2P} \\ q_{3P} \\ q_{1i} \end{bmatrix} \\ [q_{3.0}] &= [c_{11} \quad 0 \quad 0] \cdot \begin{bmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (24)$$

donde

$$A = \begin{bmatrix} -K_{30.2} & 1 & 0 \\ -K_{30.1} & 1 & 0 \\ -K_{30.0} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$



$$B = \begin{bmatrix} 0 & -K_{20.2} & 0 & K_{3P.2} & 0 \\ -K_{10.1} & -K_{20.1} & K_{3P.1} & K_{3P.1} & 0 \\ -K_{10.0} & -K_{20.0} & K_{2P.0} & 0 & K_{1.i} \end{bmatrix}$$

$$C^T = [1 \quad 0 \quad 0]$$

$$D = [0]$$

### 7.3.6.6. Modelo dinámico en Variables de Estado de Laplace (MVEs) aplicado a Sistema de Zanjas

Una forma de solución general al sistema de ecuaciones MVE-  $\ddot{q}_{3.0}$  propuesto, se obtiene aplicando transformada de Laplace al modelo MVEt, obteniendo un MVE de variables de estado en el dominio de Laplace, representado por  $MVEs = L\{MVEt\}$ . Obtenido dicho modelo, i.e. las matrices de parámetros, luego se procede a derivar las expresiones en el dominio del tiempo, para variables de estados y salidas de interés.

En este contexto, la estructura general del modelo MVEs se define como sigue:

$$\left. \begin{aligned} s \cdot X(s) &= A \cdot X(s) + B \cdot Q_i(s) \\ \underline{Q_{3.0}}(s) &= C^T \cdot X(s) + D \cdot Q_i(s) \end{aligned} \right| \quad (25)$$

y aplicándolo al análisis de zanja3 en  $Z^{n=3}$  se obtiene el sig. modelo MVEs:

$$\left. \begin{aligned} \begin{bmatrix} s \cdot x_0(s) \\ s \cdot x_1(s) \\ s \cdot x_2(s) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -K_{30.2} & 1 & 0 \\ -K_{30.1} & 1 & 0 \\ -K_{30.0} & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_0(s) \\ x_1(s) \\ x_2(s) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -K_{20.2} & 0 & K_{3P.2} & 0 \\ -K_{10.1} & -K_{20.1} & K_{3P.1} & K_{3P.1} & 0 \\ -K_{10.0} & -K_{20.0} & K_{2P.0} & 0 & K_{1.i} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} q_{10}(s) \\ q_{20}(s) \\ q_{2P}(s) \\ q_{3P}(s) \\ q_{1i}(s) \end{bmatrix} \\ [q_{3.0}(s)] &= [1 \quad 0 \quad 0] \cdot \begin{bmatrix} x_0(s) \\ x_1(s) \\ x_2(s) \end{bmatrix} \end{aligned} \right| \quad (26)$$

### 7.3.6.7. Solución MVEt usando transformada inversa $L^{-1}\{MVEs\}$

La expresión  $\bar{x}(t)$ ,  $\bar{q}_{3.0}(t)$  se obtiene aplicando transformada inversa de Laplace ( $L^{-1}$ ) sobre formulación de estados  $X(s)$  y  $Q_o(s)$  respectivamente. Despejando vector de variables de estado  $X(s)$ , se tiene:

$$X(s) = (sI - A)^{-1} \cdot X(0) + (sI - A)^{-1} \cdot B \cdot Q_i(s)$$

a partir de lo cual, la expresión de variables de estado en el dominio del tiempo queda:

$$\vec{x}(t) = L^{-1}\{X(s)\} = L^{-1}\{(sI - A)^{-1} \cdot X(0) + (sI - A)^{-1} \cdot B \cdot Q_i(s)\}$$

de donde:

$$\vec{x}(t) = e^{At} \cdot x(0) + \int_0^t e^{A(t-\tau)} \cdot B \cdot q_i(\tau) \cdot d\tau$$

y consecuentemente el vector de salidas de flujo de interés, para el esquema de zanjas, queda entonces definido por:

$$\vec{q}_{3,0}(t) = L^{-1}\{[C^T \cdot (sI - A)^{-1} \cdot B + D] \cdot Q_i(s)\}$$

finalmente, para el modelo dinámico MVE propuesto, las expresiones de cálculo matricial en dominio de Laplace, para aplicar antitransformada se obtienen como:

$$\vec{q}_{3,0}(t) = L^{-1}\left\{ [1 \ 0 \ 0] \cdot \left( s \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -K_{30.2} & 1 & 0 \\ -K_{30.1} & 1 & 0 \\ -K_{30.0} & 0 & 0 \end{bmatrix} \right)^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 0 & -K_{20.2} & 0 & K_{3P.2} & 0 \\ -K_{10.1} & -K_{20.1} & K_{3P.1} & K_{3P.1} & 0 \\ -K_{10.0} & -K_{20.0} & K_{2P.0} & 0 & K_{1.i} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} q_{10}(s) \\ q_{20}(s) \\ q_{2P}(s) \\ q_{3P}(s) \\ q_{1i}(s) \end{bmatrix} \right\} \quad (31)$$

### 7.3.7. Acondicionamientos estructurales y de variables de diseño para Desarrollo de Modelos

La sección siguiente presenta una síntesis de formulaciones complementarias – propuestas por Vargas (2010)– para el desarrollo e implementación de los modelos propuestos.

#### Cálculo de caudal punta (m<sup>3</sup>/seg)

$$Q_{esc} = \frac{C \times I \times A \times K}{360}$$

donde,

C = Coeficiente de Escorrentía (valor adimensional, por tabla)

I = Máxima intensidad media de precipitaciones en 1 hora para el período de retorno determinado (mm/h)

A = Área (ha)

K= Coeficiente corrector de seguridad para cuencas pequeñas 1.2 (adimensional).

#### Cálculo de la precipitación efectiva

$$Pe = C \times I \times K$$

donde,

C: Coeficiente de Escorrentía (valor adimensional por tabla)

I: Máxima intensidad media de precipitaciones en 1 Hora para el mismo período de retorno (mm/hora)

K: Coeficiente corrector de seguridad para cuencas pequeñas. 1.2 (adimensional)

#### Cálculos de Diseño estructural de zanjas

Las zanjas son discontinuas. Para el distanciamiento horizontal de las zanjas:

a) sin área de tabiques:

$$D = \frac{1000 \times Vz}{L \times Pe}$$

donde,

D: distanciamiento horizontal (m)

Vz: Volumen de la zanja

L: largo de la zanja

Pe: precipitación efectiva (mm/h)

#### Distribución espacial de las zanjas.

En la implementación de terreno se requiere establecer el largo total de las zanjas y de los tabiques, tomando en consideración según terreno, el área principal, el área de primera y segunda líneas de zanjas. En este contexto se especifican los siguientes acondicionamientos dimensionales.

Considerando área de tabiques

$$D' = \frac{Lz \times D}{Lz + Lt}$$

Dónde:

Lz: Largo de la zanja (m)

Lt: Largo tabique (m)

Para tabiques distintos:

$$D'' = \frac{Ltz \times D}{Ltz + Ltt}$$

Donde:

D'': distanciamiento horizontal con tabique

Ltz: largo total de las zanjas (m)

Ltt: largo total de los tabiques (m)

Comprobar que Volumen Total de Zanjas > Caudal Máximo

### **Funcionalidad de zanja**

$$Vi = \frac{Dh \times 600}{t}$$

Donde,

Vi : velocidad de infiltración en mm/h

Dh: diferencial de la altura del agua en cm

t : diferencial de tiempo en min.

### **Volumen máximo de agua que soporta una zanja**

$$Vazi = Vazz + Vazin$$

Donde,

Vazi : volumen de aportación de la zona de impluvio

Vazz: volumen de captación de la zona de zanjas

Vazin: volumen de infiltración

### **Distancia horizontal entre zanjas**

$$d = \frac{b \times (h + v)}{l \times e}$$

Donde,

d : distanciamiento horizontal entre zanjas

b : base de la zanja

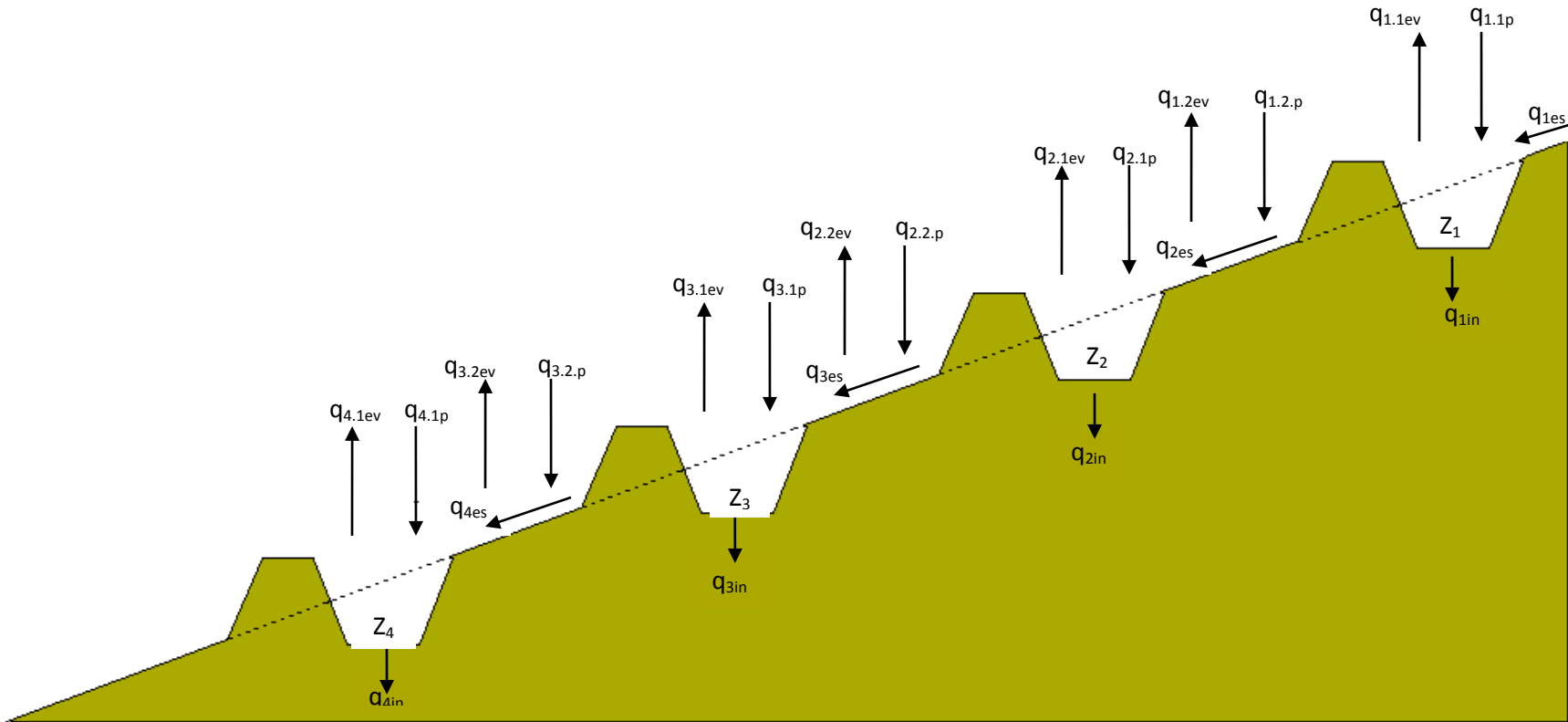
h : altura de la zanja

v : velocidad de infiltración de la zanja

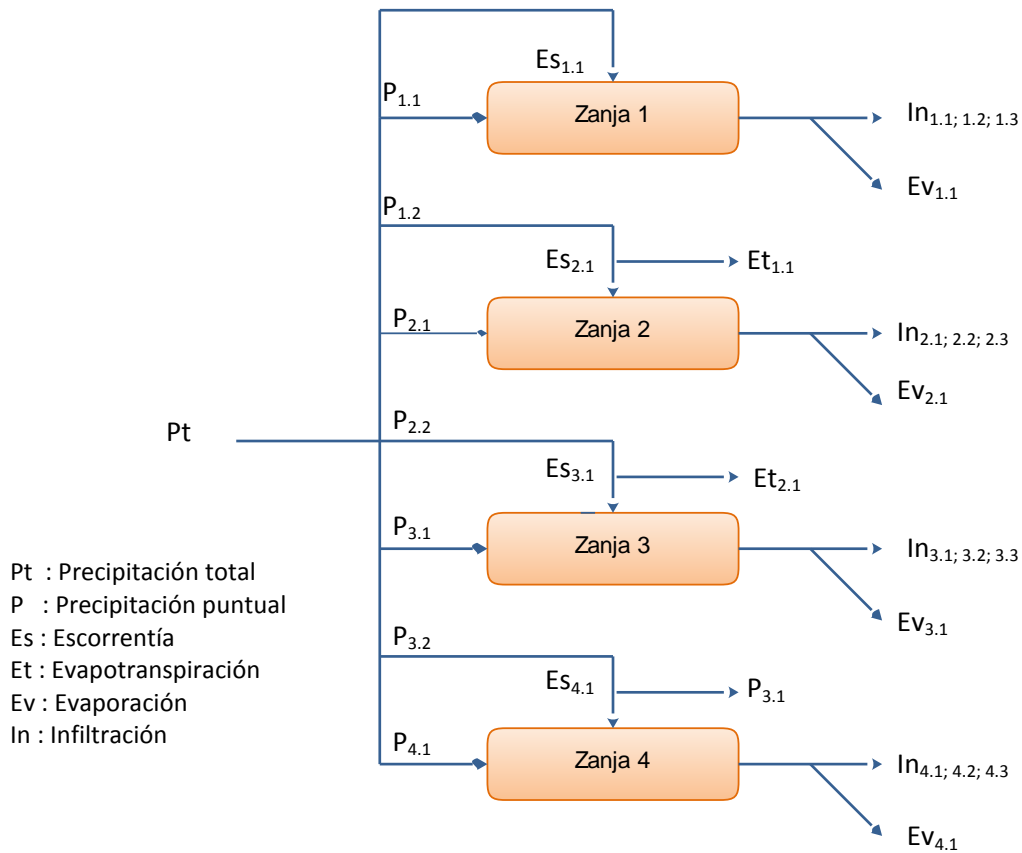
l : largo de la zanja

e : coeficiente de escorrentía.

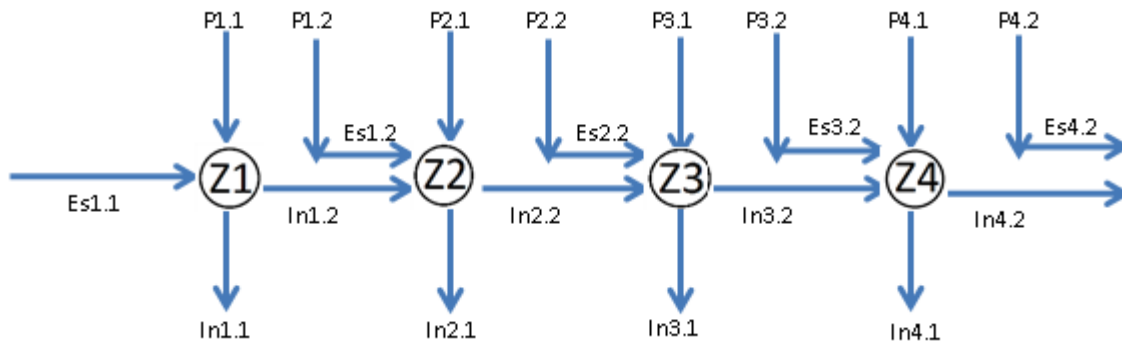
### Conceptualización de variables de flujo para Sistema de "n=4" zanjas ( $Z^{n=4}$ )



**Figura 7.66. Esquema de zanjas de infiltración con corrientes de entrada y salida.** Las zanjas de infiltración funcionan como un sistema en el cual se captura el agua de las precipitaciones aumentando con ello la infiltración y el abastecimiento de las napas freáticas. En el balance total participan corrientes de entrada y salida dados por el ciclo hidrológico, en el cual, influyen procesos como la evaporación y la evapotranspiración, la cual, depende de la cobertura y las especies vegetales. La infiltración a su vez, está dada por las características intrínsecas del suelo. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 7.67. Modelo de cajas del sistema de zanjas de infiltración.** Los flujos de entrada al sistema están dados por las precipitaciones, en este caso, por la precipitación puntual ( $P_{x,y}$ ) que cae específicamente en las zanjas y las precipitaciones que generan las escorrentías superficiales que contribuyen a su abastecimiento. Las salidas del sistema están dadas por la evaporación, evapotranspiración y la infiltración. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 7.68. Modelo lógico de los flujos en un sistema de zanjas de infiltración.** La figura indica los flujos que ingresan y salen de un sistema de 4 zanjas, donde inciden la escorrentía, la precipitación y la infiltración. Fuente: Elaboración propia.

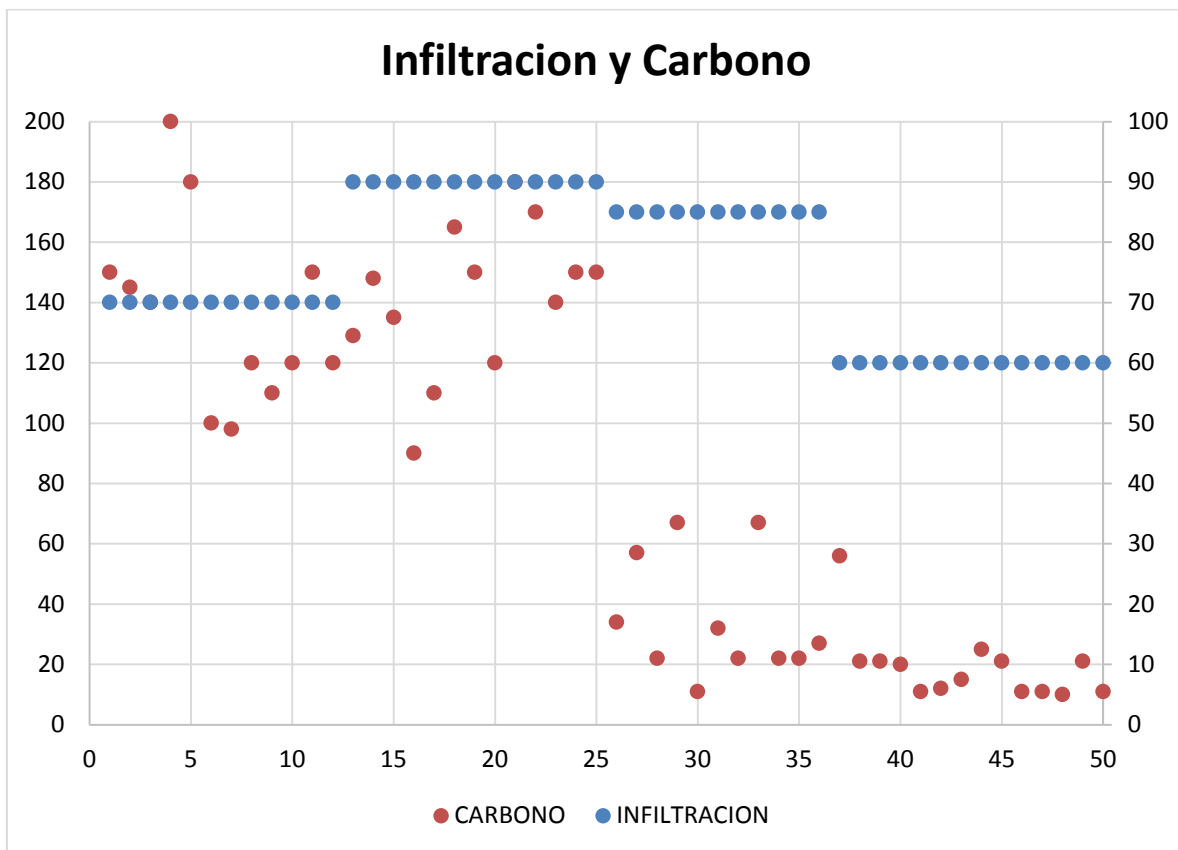
$$\begin{aligned}
 Q_{Z1} &= (Es_{1.1} + P_{1.1}) - (In_{1.1} + In_{1.2}) \\
 Q_{Z2} &= (In_{1.2} + Es_{1.2} + P_{2.1}) - (In_{2.1} + In_{2.2}) \\
 Q_{Z3} &= (In_{2.2} + Es_{2.2} + P_{3.1}) - (In_{3.1} + In_{3.2}) \\
 Q_{Z4} &= (In_{3.2} + Es_{3.2} + P_{4.1}) - (In_{4.1} + In_{4.2})
 \end{aligned}$$

## 7.4. FORMULACION DEL MODELO DE REDES NEURONALES ARTIFICIALES

### 7.4.1. Análisis y orden de datos

Se presenta un análisis de los datos, encontrando que las variables tienen poca definición considerando:

- La primera variable, Tipo de suelos, se codifica de 1 a 5 de acuerdo al tipo de suelo, pero solo existen 2 opciones reales que se exponen en el problema. Los tipos que se muestran son el tipo 2 y el tipo 3. Esto implicará considerar dos formas de codificar los datos, uno ampliando el rango completo de 1 a 5 y otra como variable binaria. El argumento de la primera codificación es que el objetivo de la red es poder conocer el comportamiento de la producción de carbono dado otras características del suelo, esto se llama plasticidad de las redes neuronales. Por otro lado, se observa un comportamiento
- La segunda variable, Infiltración, se observa que hay cuatro opciones: 70 90 85 60. Esta variable no se relaciona de forma lineal con la variable de salida Carbono.



**Figura 7.69. Variable infiltración.** Esta variable no se relaciona de forma lineal con la variable de salida Carbono. Fuente. Elaboración propia.

- La tercera variable, Pendiente, tampoco se relaciona con el Carbono de forma lineal, pero si se puede observar una relación entre Infiltración y Pendiente.

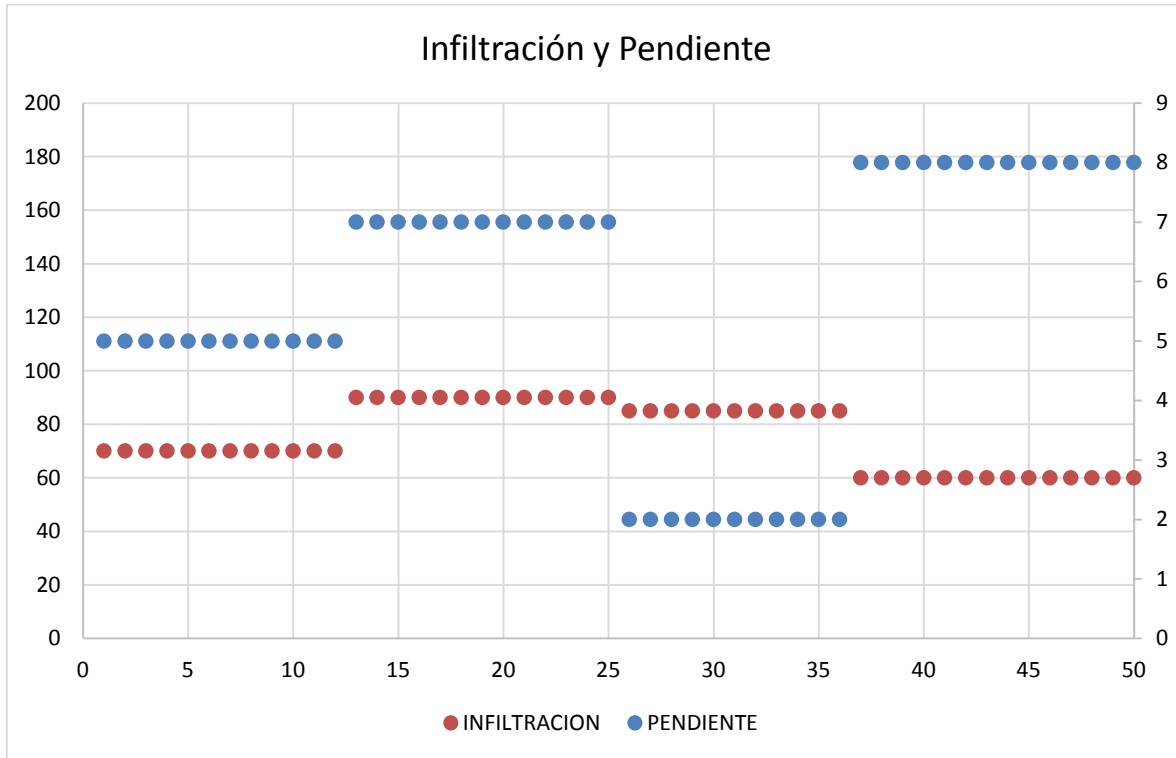


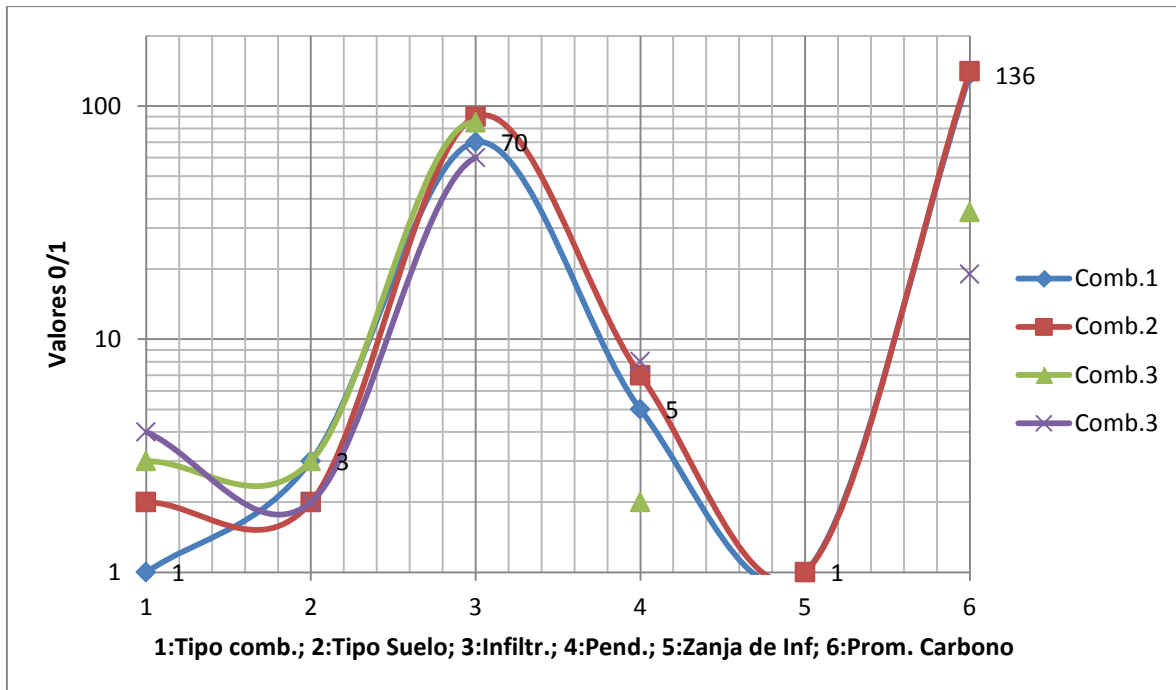
Figura 7.70. Relación infiltración y pendiente. Fuente. Elaboración propia.

- La cuarta variable, Zanjas de infiltración, se expresa de forma binaria, y separa al conjunto completo de individuos en dos, los tipo 1 y los tipo 0. Esta variable tiene una dependencia proporcional con el Carbono.
- Todas las variables en conjunto, forman cuatro formas de combinaciones posibles, estas son:

	Tipo de suelo	infiltración	pendiente	zanjas de infiltración	promedio carbono
Combinación 1	3	70	5	1	136
Combinación 2	2	90	7	1	141
Combinación 3	3	85	2	0	35
Combinación 4	2	60	8	0	19

Tabla 7.77. Combinaciones de las variables del modelo. Todas las variables en conjunto, forman cuatro formas de combinaciones posibles Fuente: Elaboración propia.





**Figura 7.71. Gráfico de combinaciones de las variables del modelo.** Fuente. Elaboración propia.

Esta característica de agrupación de vectores da luces para aplicar modelos de distancia vectorial y de redes neuronales basadas en Clúster. Los modelos mencionados anteriormente, relacionan al vector con una salida en específico, en este caso, se propone que sea el promedio de Carbono entre los vectores que contengan tal combinación.

De acuerdo al análisis de las variables, este problema tiene características no-lineales, esto implica que los resultados se expresen con un cierto porcentaje de acierto, ya que no se puede resolver linealmente.

El error se calcula de acuerdo al Error Cuadrático Medio para cada combinación de vectores, además se promedia este error entregando un error global. Todas las variables se mapean en una función lineal que va desde -1 a 1 y otra que va desde 0 a 1. Luego de los ensayos, se llega a la conclusión de que no afecta un mapeo de otro, ya que las redes neuronales observan los mismos patrones en ambos casos de codificación.

#### 7.4.2. Conjunto de entrenamiento, validación y testeo.

Para el conjunto de entrenamiento se seleccionaron, al azar, cuatro vectores de la combinación 1, cuatro vectores de la combinación 2, cuatro vectores de la combinación 3 y cuatro vectores de la combinación 4. 16 vectores en total.

Para el conjunto de validación se seleccionaron, al azar, cuatro vectores de la combinación 1, cuatro vectores de la combinación 2, cuatro vectores de la combinación 3 y cuatro vectores de la combinación 4. 16 vectores en total.

Para el conjunto de testeo se seleccionaron, al azar, cuatro vectores de la combinación 1, cinco vectores de la combinación 2, tres vectores de la combinación 3 y seis vectores de la combinación 4. 18 vectores en total.

### 7.4.3. Método Clúster Matlab

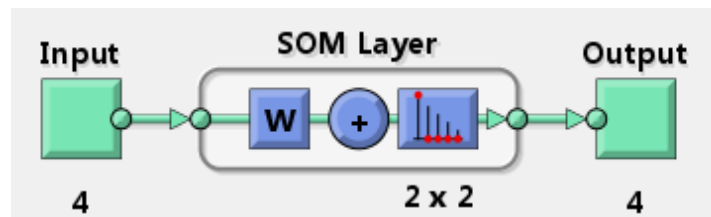
Este tipo de red Clúster tiene sus fundamentos en el auto organización. Un mapa auto-organizativo consiste en una capa de competencia que clasifica los vectores de entrada en varias clases de acuerdo a la capa de neuronas de salida. La topología de las neuronas forma un mapa 2D, donde las dimensiones dependen de cuantas clasificaciones se requiera.

En este problema específico, observamos 4 promedios distintos de carbono, es por ello que la capa de salida tendrá una dimensión de 2 x 2, es decir, 4 clasificaciones posibles. Esta red podrá predecir para casos nuevos la clase a la que pertenecen, y cada clase representa un promedio de carbono.

La rutina de entrenamiento, mapea los vectores de entrada en una capa final de neuronas de N x M, en donde los vectores de entrada irán ordenándose, de acuerdo a sus características, en una u otra neurona de salida.

Este aprendizaje es no supervisado, ya que no necesita de un vector de salida para comparar las salidas con un objetivo.

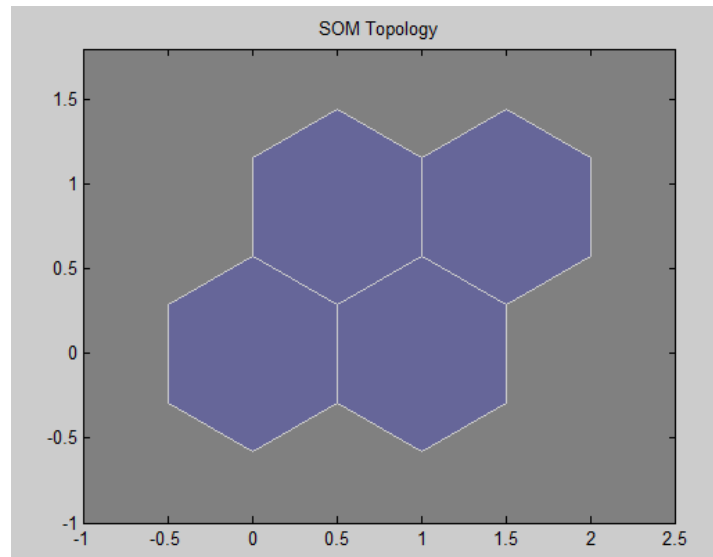
#### 7.4.3.1. Características de la red Clúster



**Figura 7.72. Esquema de la red clúster.** Se observa la entrada con cuatro neuronas, la capa con el mapa auto organizado de 2 x 2 y la salida de 4 neuronas.

Los parámetros de la red son:

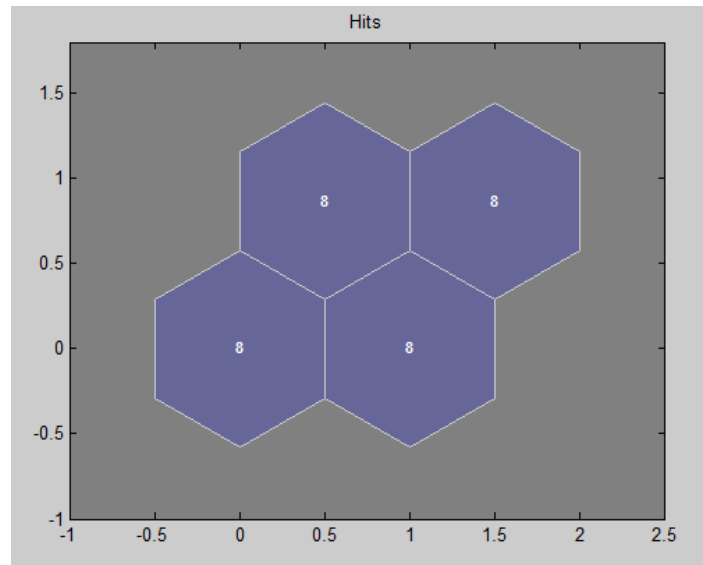
- Tipo de red: Mapa Auto-organizativo
- Datos de entrada: matriz de 4x32, representado 32 muestras de 4 características.
- Función de entrenamiento: "trainubwb", algoritmo de lotes.
- Función de aprendizaje: "learnsomb"
- Función de topología: "hextop"
- Función de distancia entre neuronas: "linkdist"



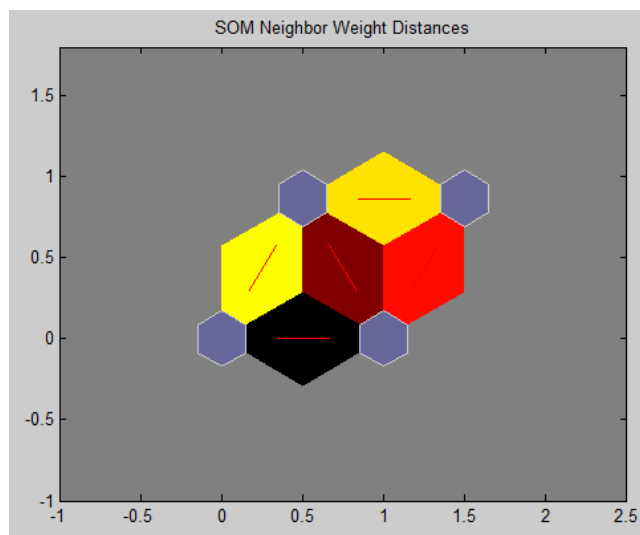
**Figura 7.73. Tipología de la red clúster.** Fuente: Elaboración propia

#### 7.4.3.2. Entrenamiento

El resultado del entrenamiento se muestra en la siguiente figura:



**Figura. 7.74. Resultado de entrenamiento.** El grafico muestra que para cada neurona, le corresponden ocho vectores específicos, estos grupos de vectores se diferencian de acuerdo a la clasificación definida. Fuente: Elaboración propia



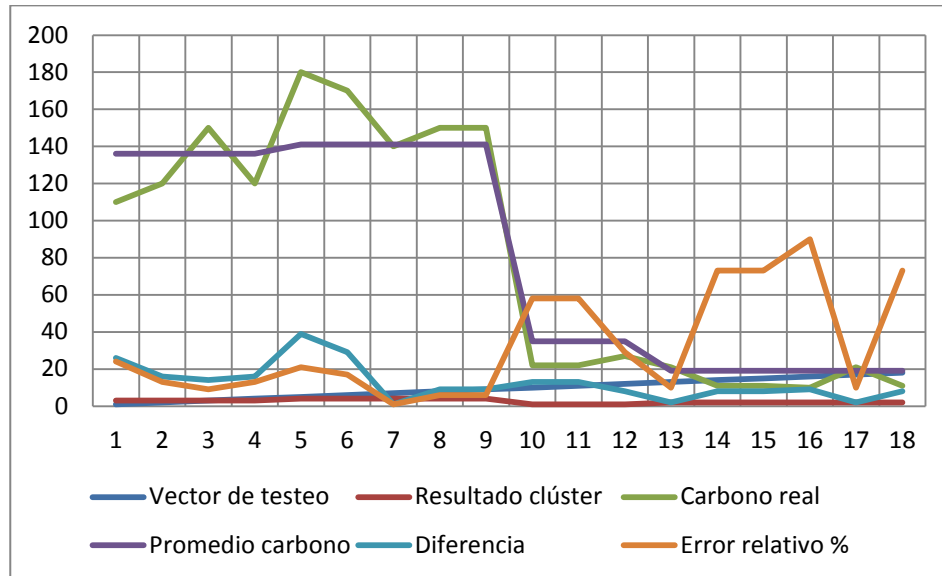
**Figura 7.75. Distancias entre las neuronas de salida.** Las neuronas son los objetos con forma de hexágonos mientras que los colores representan la distancia entre estas neuronas, donde el color más oscuro representa la menor distancia. Se observa que la neurona (0,0) y (1,0) están muy cerca, eso explica que el promedio de carbono para la combinación 1 y 2 es cercano (136 y 141 respectivamente). Fuente: Elaboración propia.

#### 7.4.3.3. Resultados

Vector de testeo	Resultado clúster	Carbono real	Promedio carbono	Diferencia	Error relativo %
1	3	110	136	26	24
2	3	120	136	16	13
3	3	150	136	14	9
4	3	120	136	16	13
5	4	180	141	39	21
6	4	170	141	29	17
7	4	140	141	1	1
8	4	150	141	9	6
9	4	150	141	9	6
10	1	22	35	13	58
11	1	22	35	13	58
12	1	27	35	8	29
13	2	21	19	2	10
14	2	11	19	8	73
15	2	11	19	8	73
16	2	10	19	9	90
17	2	21	19	2	10
18	2	11	19	8	73
<b>Promedio:</b>				<b>13</b>	<b>32</b>

**Tabla 7.78. Resultados de la red clúster.** La desventaja de esta red, es que entrega la categoría final expresada en el promedio de carbono y no un valor más exacto. Fuente: Elaboración propia.

La red clúster aplicada muestra excelentes resultados, clasifica a los vectores de entrenamiento y validación en cuatro categorías definidas. Luego se aplica la red a los vectores de testeo y acertó en todos los casos.



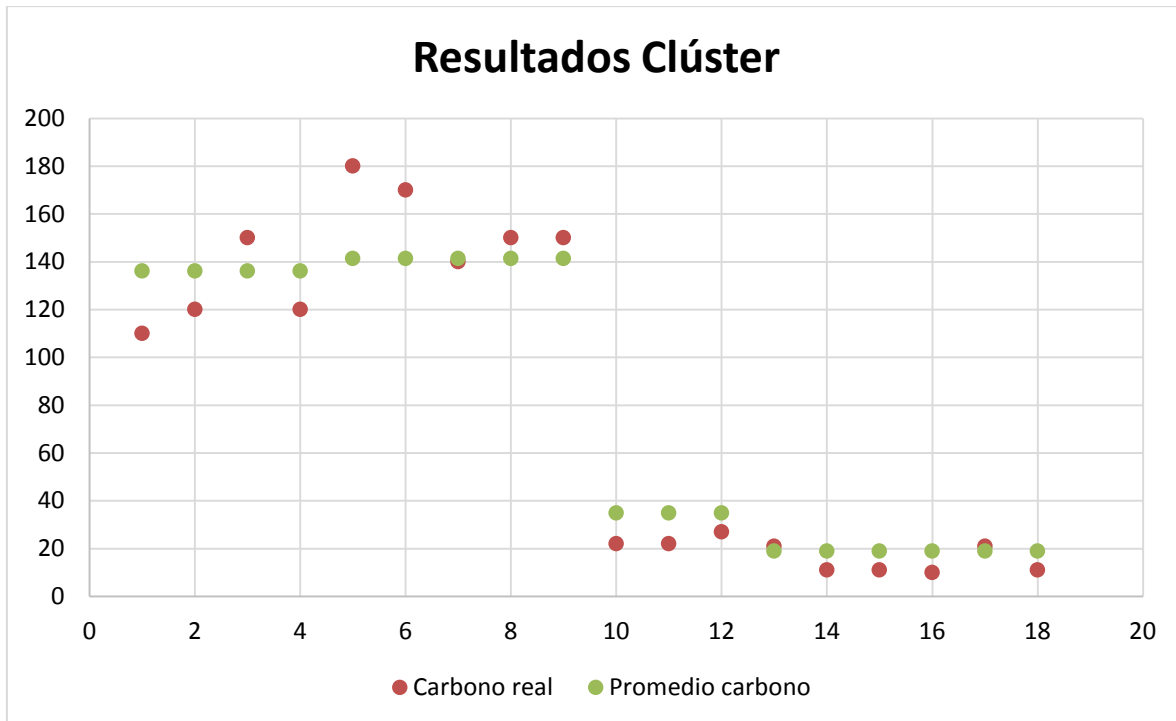
**Figura 7.76. Gráfico de resultados red cluster.** Fuente. Elaboracion propia.

### Algoritmo en Matlab

```

clc
clear all
p=importdata('JAP.txt'); % p vector de entrada
t=importdata('JAAt.txt');
tt=importdata('JAtest.txt');
[ttn,tts]=mapminmax(tt); %ttn vector de testeo normalizado
[pn,ps]=mapminmax(p); %pn vector de entrada normalizado
[tn,ts]=mapminmax(t); %tn vector de salida normalizado
dimension1 = 4;
dimension2 = 4;
net = newsom(pn,[dimension1 dimension2]);
[net,tr] = train(net,pn);
outputs = sim(net,pn);
Simtts = sim(net,ttn);

```



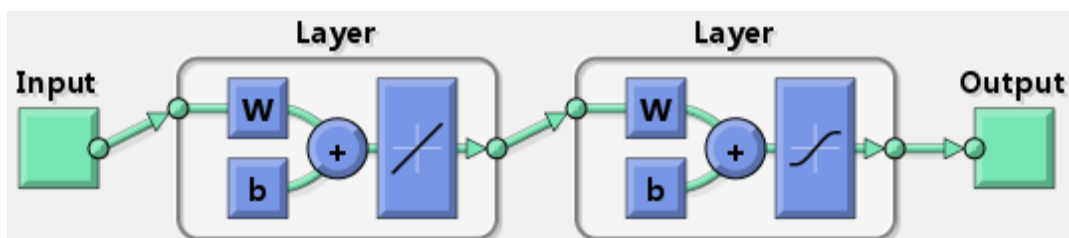
**Figura 7.77. Resultados red clúster carbono real y carbono promedio.** Fuente: Elaboración propia.

#### 7.4.4. Método Red Backpropagation Matlab

Para problemas de reconocimiento de patrones, la red backpropagation, explicada en la introducción, muestra buenos resultados al momento de aproximar cualquier tipo de funciones continuas en el espacio  $\mathbb{R}^n$ .

El algoritmo de backpropagation (propagación hacia atrás), este algoritmo de entrenamiento se encarga de minimizar el error cuadrático medio (MSE), mediante el descenso del gradiente en cada iteración. Este además es un algoritmo supervisado ya que solo una porción de los datos se utilizan para el entrenamiento, otra porción para la validación y el resto se utiliza para probar/testear la red.

##### 7.4.4.1. Características de la Red Backpropagation



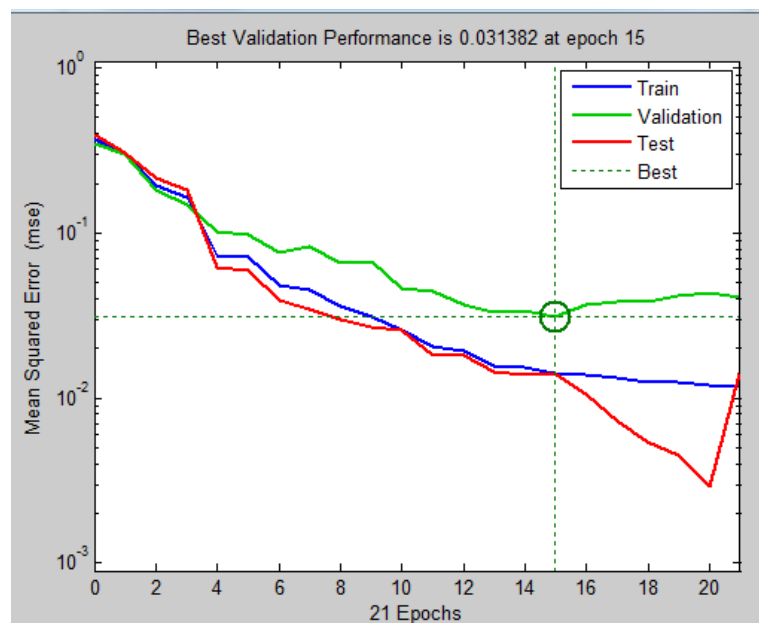
**Figura 7.78. Esquema de la red Backpropagation.** Se observa la entrada que interactúa con los pesos  $W$  y  $b$  es la función umbral de la capa oculta. La segunda capa representa la capa de salida.

Los parámetros de la red son:

- Tipo de red: Red Backpropagation (propagación hacia atrás)
- Datos de entrada: matriz de 4x32, representado 32 muestras de 4 características.
- Datos de salida: matriz de 1x32, representado 32 muestras de 1 característica.
- Función de entrenamiento: "traingdm", regla delta generalizado
- Función de aprendizaje: "learngdm"
- Una capa oculta con 10 neuronas.

#### 7.4.4.2. Entrenamiento

El resultado del entrenamiento se muestra en la siguiente figura:



**Figura 7.79. Resultado de entrenamiento.** El gráfico muestra como el error cuadrático medio va disminuyendo hasta encontrar un mínimo, el cual es 0,031382 a la quinceava iteración (época). Con esa configuración de pesos de la red, el conjunto de testeo tiene un error incluso menor. Esta fue el mejor resultado de seis intentos de redes de backpropagation, en cada una se variaron las características y esta mostro los mejores resultados. Fuente: Elaboración propia.

#### 7.4.4.3. Resultados

La red backpropagation aplicada muestra resultados parecidos al Clúster en términos de error porcentual, pero la gran diferencia es que la red backpropagation entrega valores numéricos y no una clasificación, eso la hace más flexible al momento de ingresarle casos nuevos a la red.

Testeo	Carbono real	Promedio carbono	Diferencia	Error relativo %
1	110	161	51	47
2	120	161	41	34
3	150	161	11	7
4	120	161	41	34
5	180	122	58	32
6	170	122	48	28
7	140	122	18	13
8	150	122	28	18
9	150	122	28	18
10	22	43	21	94
11	22	43	21	94
12	27	43	16	58
13	21	12	9	44
14	11	12	1	7
15	11	12	1	7
16	10	12	2	18
17	21	12	9	44
18	11	12	1	7
Promedio:			22	34

Tabla 7.79. Resultados de la red Backpropagation. Fuente: Elaboración propia.

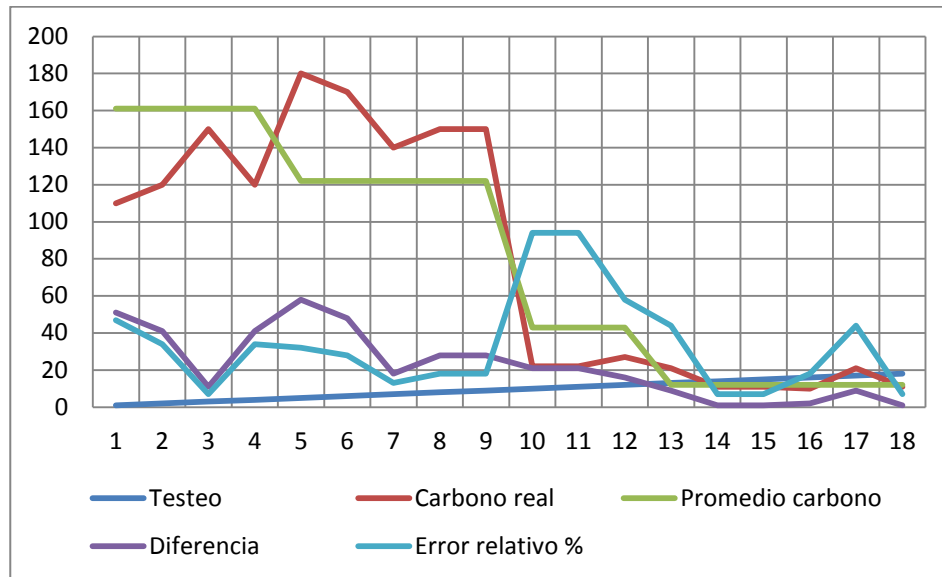
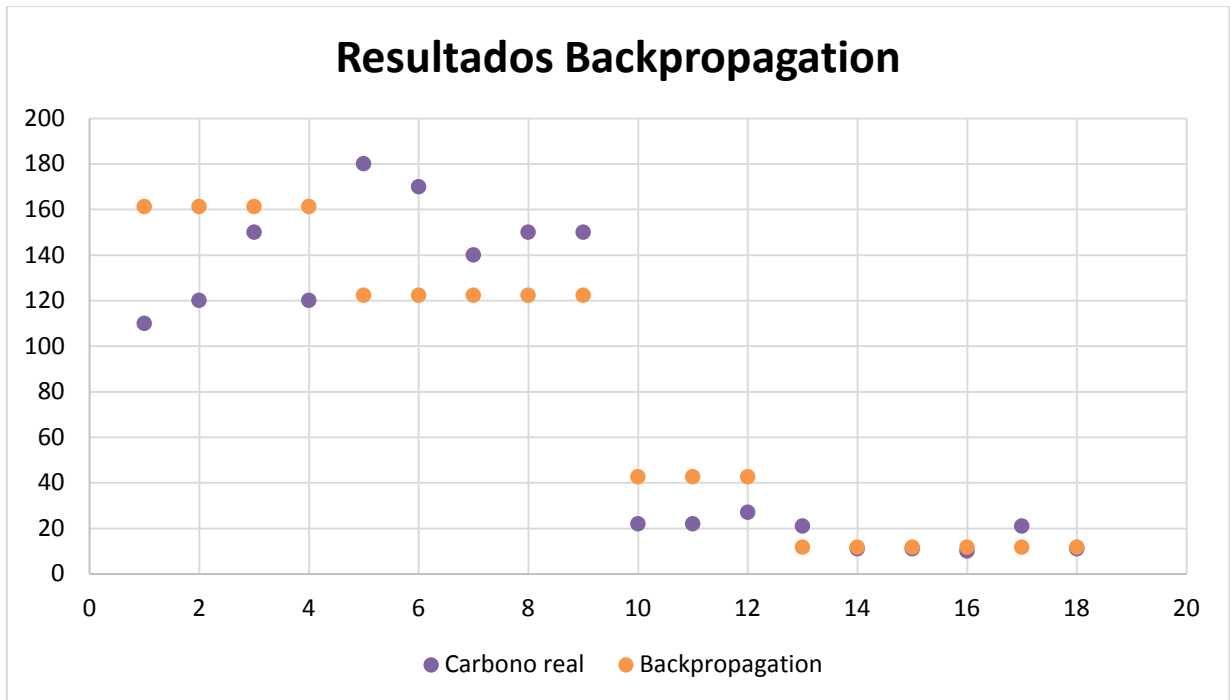


Figura 7.80. Grafico de resultados de la red Backpropagation. Fuente. Elaboracion propia.





**Figura 7.81. Resultados de la red Backpropagation con carbono real.** Fuente: Elaboración propia.

#### Algoritmo en Matlab

```

clc
clear all
p=importdata('JAP.txt'); % p vector de entrada
t=importdata('JAt.txt');
tt=importdata('JAtest.txt');
[ttn,tts]=mapminmax(tt); %ttn vector de testeo normalizado
[pn,ps]=mapminmax(p); %pn vector de entrada normalizado
[tn,ts]=mapminmax(t); %tn vector de salida normalizado
net = newpr(pn,tn,10);
[net,tr] = train(net,pn,tn);
outputs = sim(net,ttn);
plotperf(tr)
plotconfusion(targets,outputs)
e= mapminmax('reverse',outputs,ts);

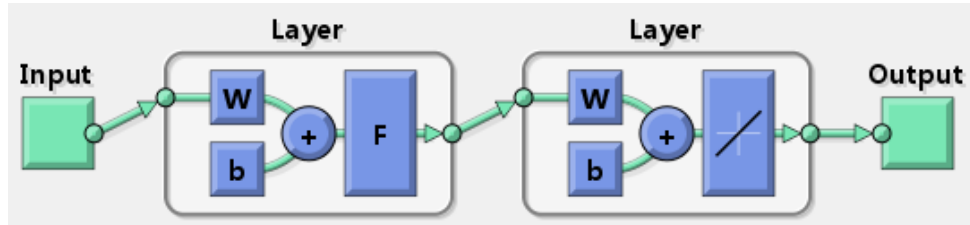
```

#### 7.4.5. Método Red Base Radial Matlab

Las Redes de Base Radial son un tipo de redes de neuronas artificiales que calculan la salida de la función en función de la distancia a un punto denominado centro. Al igual que con los perceptrones multicapa, sirven como aproximadores universales.

Las redes neuronales de base radial podrían requerir más neuronas que las redes neuronales estándar de retropropagación. Pero su entrenamiento es similar a estas. Trabajan mejor cuando hay muchos datos de entrenamiento disponibles.

#### 7.4.5.1. Características de la Red de Base Radial



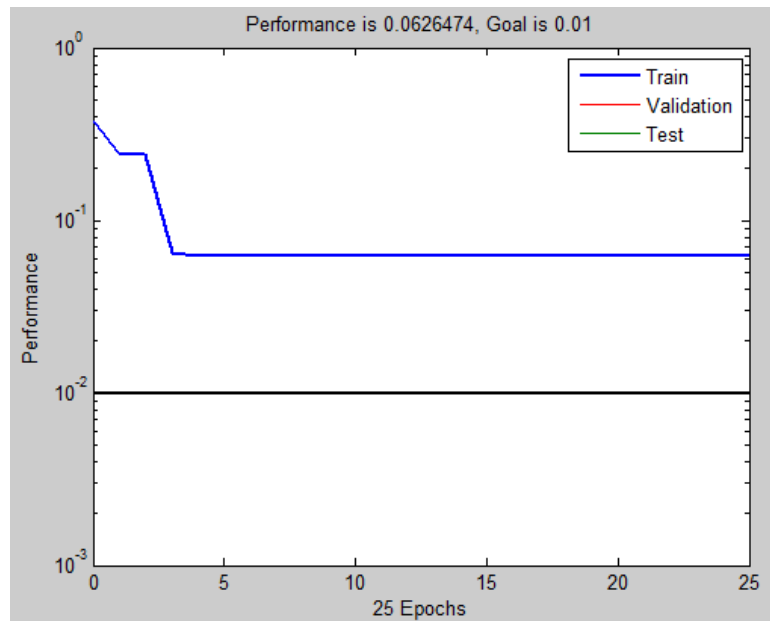
**Figura 7.82. Esquema de la Red de Base Radial.** Se observa la entrada que interactúa con los pesos  $W$  y  $b$  es la función umbral de la capa oculta. La segunda capa representa la capa de salida.

Los parámetros de la red son:

- Tipo de red: Red Base Radial
- Datos de entrada: matriz de  $4 \times 32$ , representado 32 muestras de 4 características.
- Datos de salida: matriz de  $1 \times 32$ , representado 32 muestras de 1 característica.

#### 7.4.5.2. Entrenamiento

Este tipo de red converge automáticamente a la cantidad de neuronas necesarias de acuerdo al algoritmo. En este caso particular, la red converge cuando el error es 0,062 a las cuatro iteraciones (épocas).



**Figura. 7.83. Entrenamiento de la red Base Radial.** En este caso particular, la red converge cuando el error es 0,062 a las cuatro iteraciones (épocas). Fuente. Elaboración propia.

### 7.4.5.3. Resultados

La Red de Base Radial muestra un error porcentual más grande que las redes Clúster y Backpropagation, pero presenta diferencias menores entre el valor obtenido y el valor real.

Testeo	Carbono real	Base radial	Diferencia	Error relativo %
1	110	142	32	29
2	120	142	22	18
3	150	142	8	6
4	120	142	22	18
5	180	131	49	27
6	170	131	39	23
7	140	131	9	7
8	150	131	19	13
9	150	131	19	13
10	22	39	17	77
11	22	39	17	77
12	27	39	12	44
13	21	23	2	8
14	11	23	12	106
15	11	23	12	106
16	10	23	13	126
17	21	23	2	8
18	11	23	12	106
Promedio:			18	45

Tabla 7.80. Resultados de la red Base Radial. Fuente: Elaboración propia.

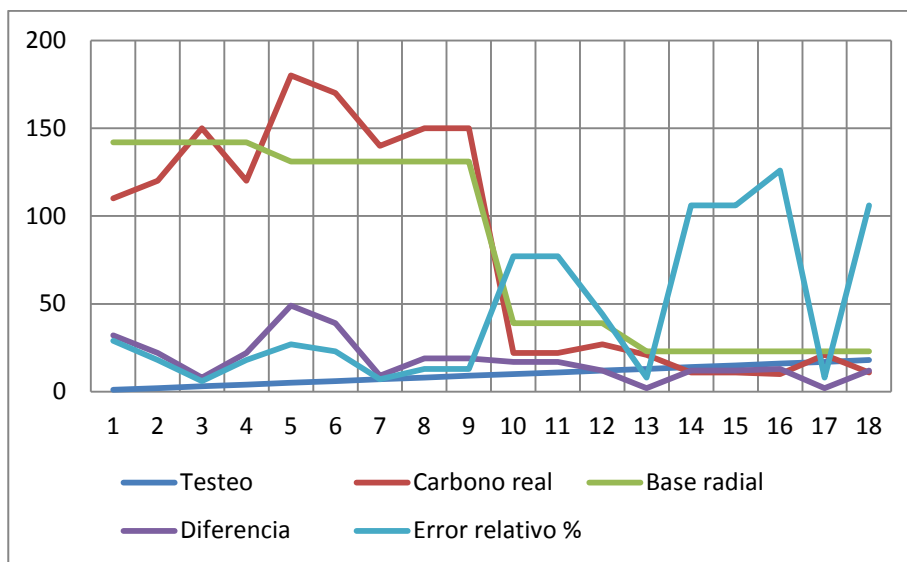
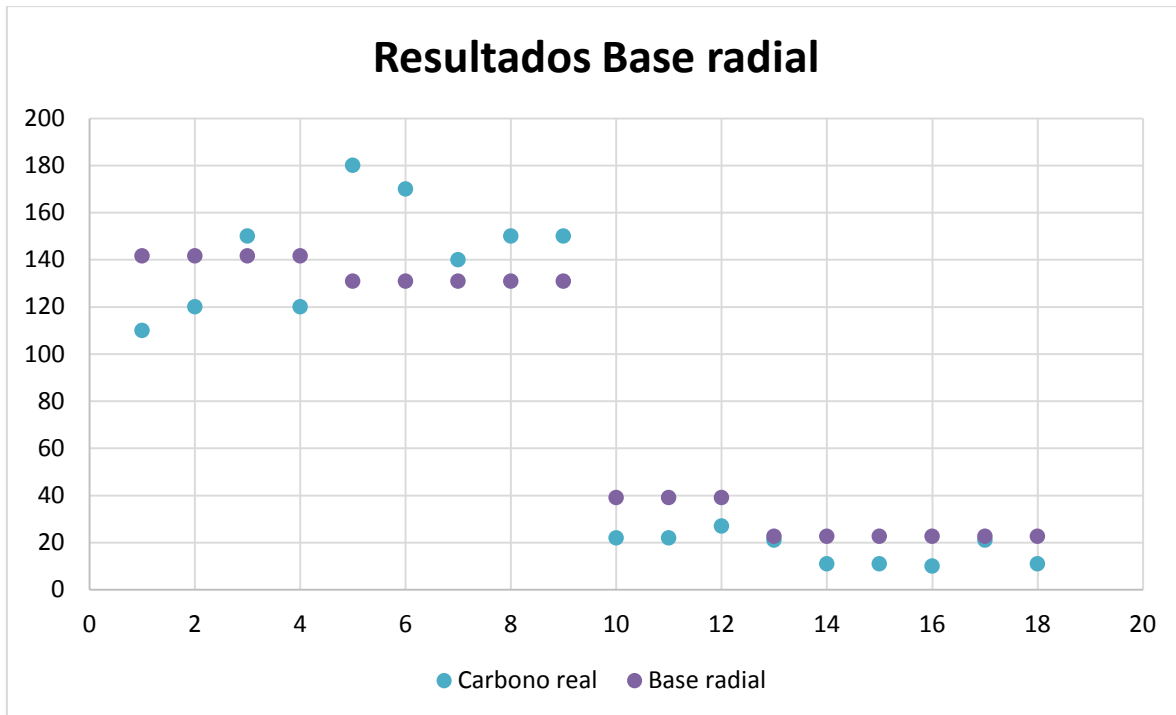


Figura 7.84. Gráfico de los resultados de la red Base radial. Fuente. Elaboracion propia.



**Figura 7.85. Resultados de la red Base Radial con carbono real.** Fuente: Elaboración propia.

Algoritmo en Matlab

```

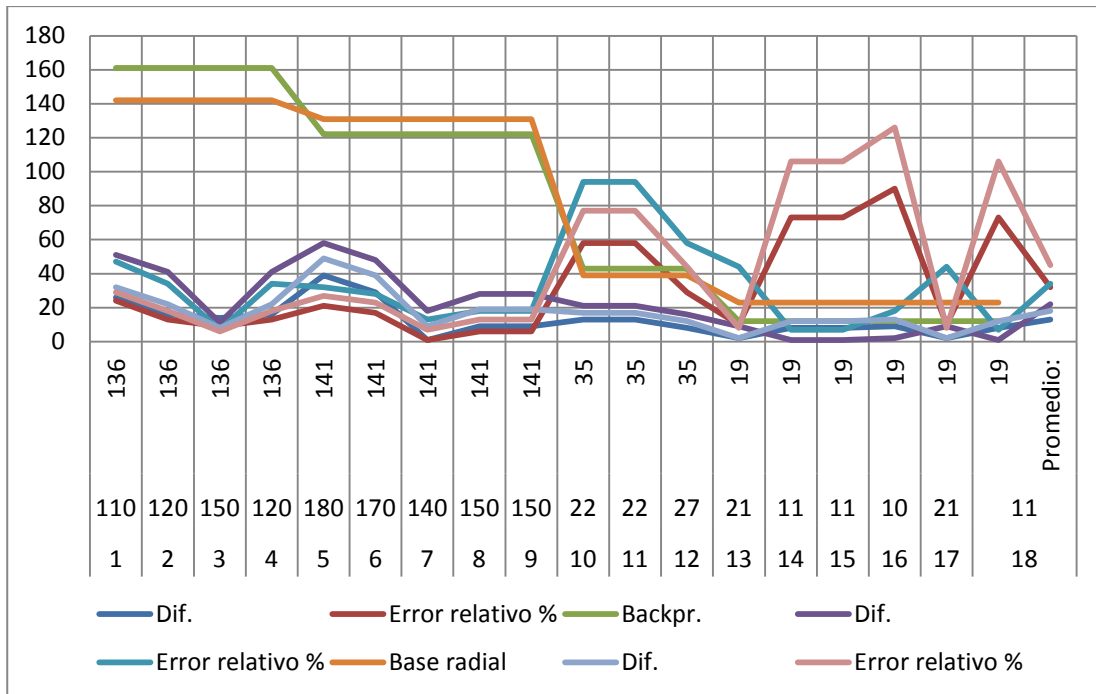
clc
clear all
p=importdata('JAP.txt'); % p vector de entrada
t=importdata('JAt.txt');
tt=importdata('JAtest.txt');
[ttn,tts]=mapminmax(tt); %ttn vector de testeo normalizado
[pn,ps]=mapminmax(p); %pn vector de entrada normalizado
[tn,ts]=mapminmax(t); %tn vector de salida normalizado
net = newrbe(pn,tn,0.5);
[net,tr] = train(net,pn,tn);
netw = sim(net,ttn);
f= mapminmax('reverse',netw,ts);

```

#### 7.4.6. Análisis global

Testeo	Carbono real	Promedio carbono Clúster	Dif.	Error relativo %	Backpr.	Dif.	Error relativo %	Base radial	Dif.	Error relativo %
1	110	136	26	24	161	51	47	142	32	29
2	120	136	16	13	161	41	34	142	22	18
3	150	136	14	9	161	11	7	142	8	6
4	120	136	16	13	161	41	34	142	22	18
5	180	141	39	21	122	58	32	131	49	27
6	170	141	29	17	122	48	28	131	39	23
7	140	141	1	1	122	18	13	131	9	7
8	150	141	9	6	122	28	18	131	19	13
9	150	141	9	6	122	28	18	131	19	13
10	22	35	13	58	43	21	94	39	17	77
11	22	35	13	58	43	21	94	39	17	77
12	27	35	8	29	43	16	58	39	12	44
13	21	19	2	10	12	9	44	23	2	8
14	11	19	8	73	12	1	7	23	12	106
15	11	19	8	73	12	1	7	23	12	106
16	10	19	9	90	12	2	18	23	13	126
17	21	19	2	10	12	9	44	23	2	8
18	11	19	8	73	12	1	7	23	12	106
		Promedio:	13	32		22	34		18	45

**Tabla 7.81. Resultados y errores de los modelos empleados.** La red Clúster tiene mayor acierto que las demás redes, pero se limita a solo entregar los cuatro valores que se encontró en el proceso de entrenamiento, es decir: 136, 141, 35 y 19. Comparando la red Base Radial y la red backpropagation, se tienen que la red Base radial tiene mejor acierto en los vectores de combinación 1 (color verde) y combinación 3 (color amarillo). La red backpropagation tiene mayor acierto para los vectores de combinación 2 (color azul) y combinación 4 (color naranja). Fuente. Elaboración propia.



**Figura 7.86. Gráfico de los resultados y errores de los modelos empleados.** Fuente: Elaboración propia.

Testeo	Diferencia	Error relativo %
1	32	29
2	22	18
3	8	6
4	22	18
5	58	32
6	48	28
7	18	13
8	28	18
9	28	18
10	17	77
11	17	77
12	12	44
13	9	44
14	1	7
15	1	7
16	2	18
17	9	44
18	1	7
<b>Promedio:</b>	<b>18</b>	<b>28</b>

**Tabla 7.82. Cálculo de error considerando resultados de tabla 7.81.** Obteniendo el menor error porcentual al combinar los dos métodos de predicción, red backpropagation y red Base Radial. Fuente. Elaboración propia.

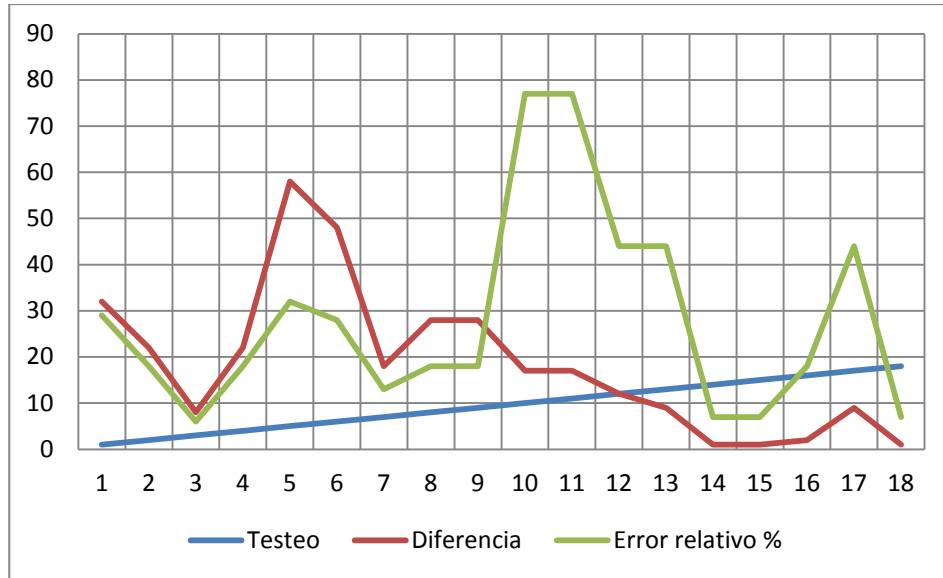


Figura 7.87. Gráfico de combinaciones de las variables del modelo. Fuente: Elaboración propia.

#### 7.4.7. Prueba del modelo para cambio de la variable suelo

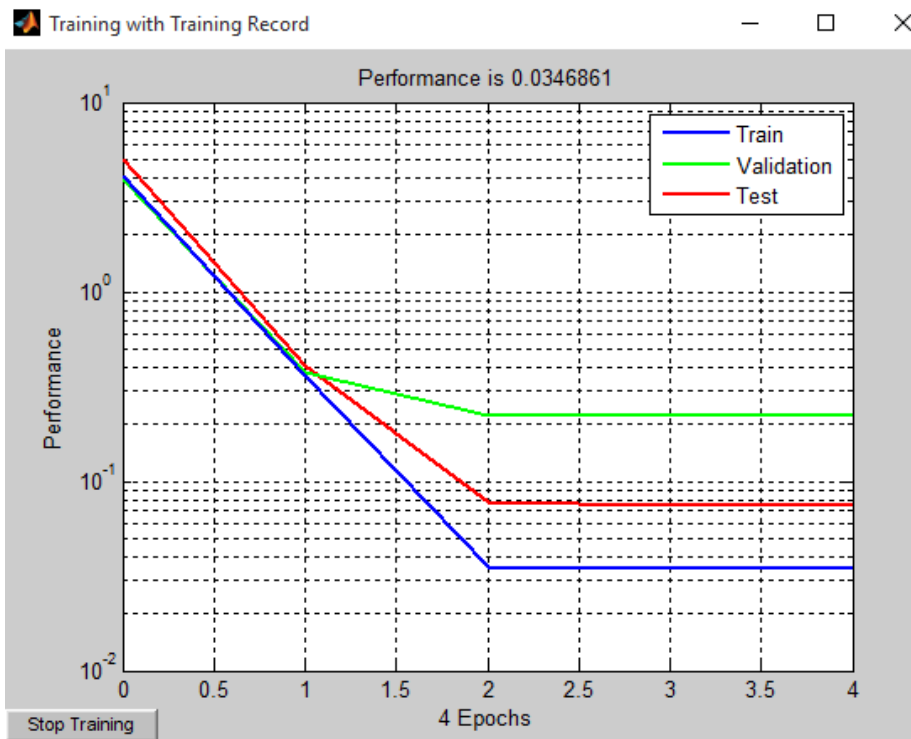
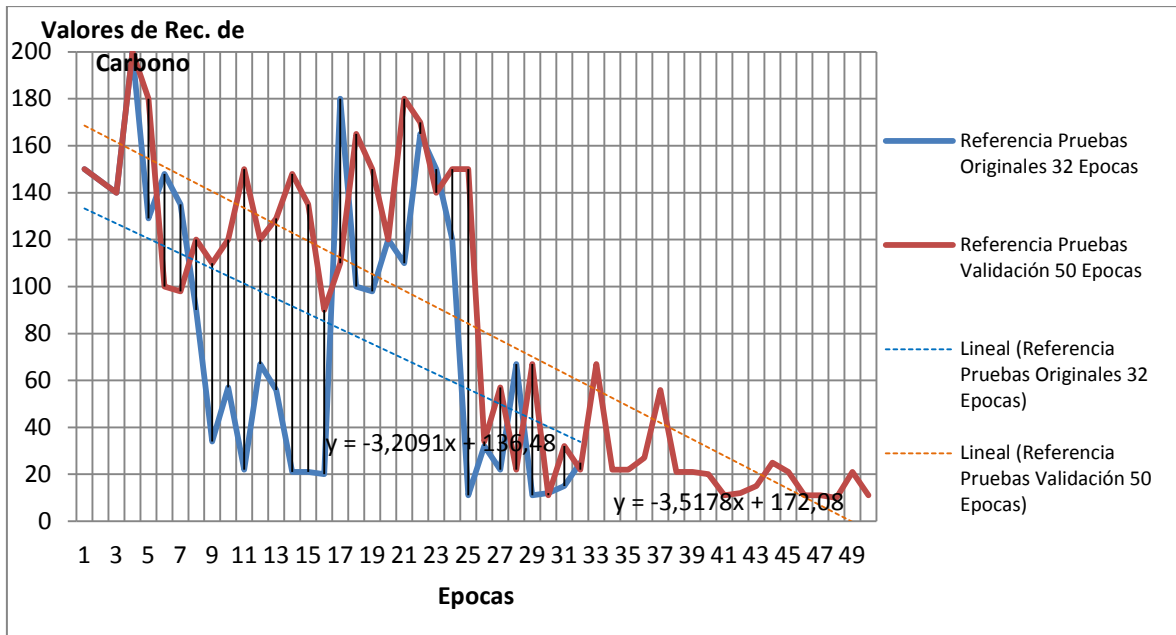
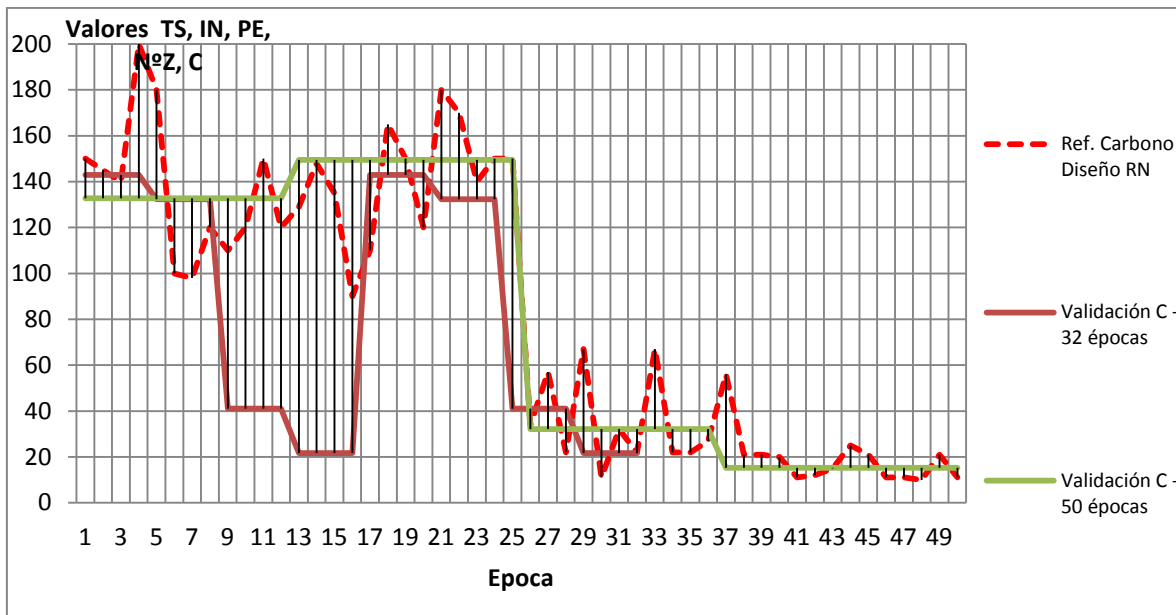


Figura 7.88. Entrenamiento de la red Backpropagation para el cambio de la variable suelo. Fuente: Elaboracion propia.



**Figura 7.89. Referencia y tendencia validación modelo de red neuronal backpropagation.**  
Fuente. Elaboración propia.



**Figura 7.90. Validación salidas modelo red neuronal backpropagation de zanjas. Recuperación de carbono.** Fuente: Elaboración propia.



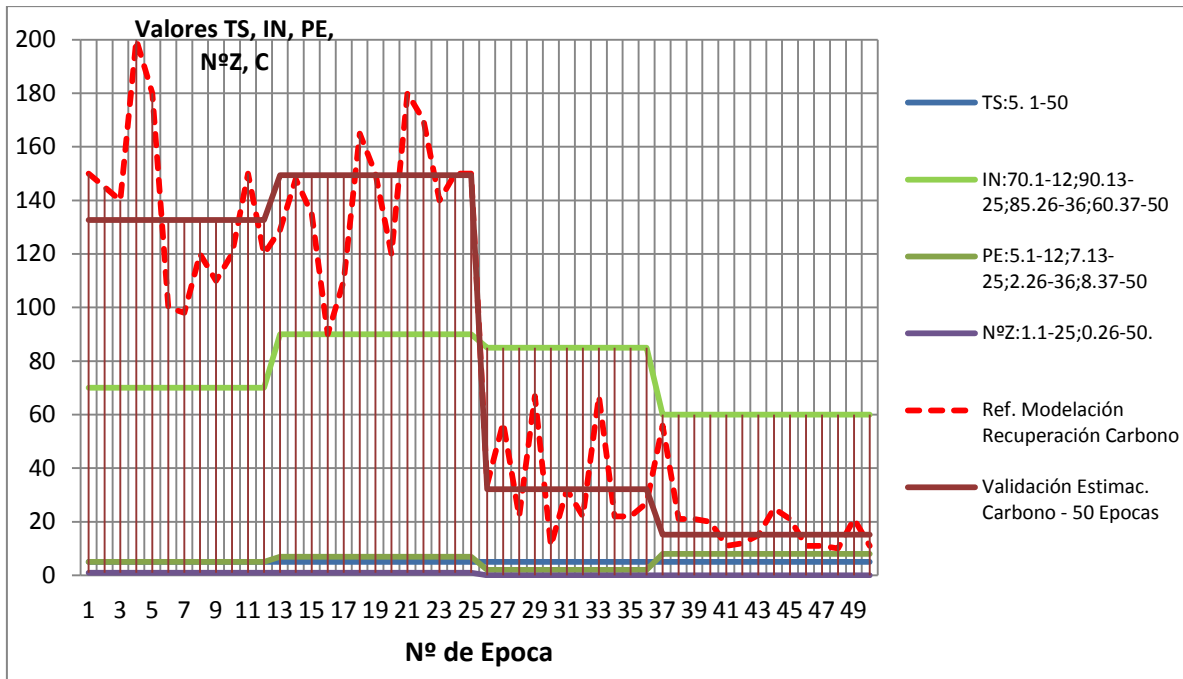


Figura 7.91. Validación modelo red neuronal backpropagation. Recuperación de carbono en zanjas con suelo=5 y variaciones IN, PE y N°Z en 50 épocas. Fuente. Elaboración propia.



---

## CAPITULO VIII

# DISCUSION Y CONCLUSIONES

---



La investigación fue centrada en los servicios ambientales generados producto de la restauración de cuencas hidrográficas según el convenio CONAF – JICA, impulsado por los gobiernos de Chile y Japón en el proyecto marco sobre restauración de cuencas hidrográficas en la zona central de Chile.

El enfoque “académico e ideal” de restauración de cuencas hidrográficas dista mucho de la realidad económica, social y política en los estados modernos debido a la falta de una institucionalidad que sustente una gestión real de sustentabilidad<sup>105</sup>. En Chile la política nacional de cuencas se estructuró en forma muy accidentada el año 2011 y su punto neurálgico está orientado solo al recurso agua omitiendo –entre muchos otros– una visión integral así como los servicios ambientales<sup>106</sup>. Estas falencias no solo tienen su origen en las transversalidades ministeriales en que cae el estado chileno y/o la falta de voluntad de la clase política, sino, en un aspecto cultural clave que está arraigado e internalizado en la sociedad chilena: la conquista española. El avance de los conquistadores en territorio chileno se llevó a cabo de norte a sur, asentándose en las riberas de los grandes ríos para tener acceso al agua y crear ciudades que fueran puntos de conexión portuarias con otros lugares del país; esto llevo a que en el país se instalara en forma paulatina una cultura de “valle” y no de “cuencas”. Es importante para los modernos enfoques de desarrollo modificar la cultura actual de “valle” a “cuencas hidrográfica” debido a que es el ordenamiento natural y la unidad básica de estructuración de un ecosistema. Esto último representa uno de los impactos claves que pretende este trabajo.

Para ello, es indispensable plantear un punto de inicio que comenzara con la conceptualización actual sobre medioambiente y las implicancias que el paradigma moderno conlleva. Hasta los años 60, la visión en Chile era el progreso y la erradicación de la pobreza independiente de las externalidades ambientales que ello implicara, relegando a segundo plano los aspectos e impactos ambientales. Sin embargo, la coyuntura histórica actual y los problemas ambientales a los cuales se enfrenta el país (sequia, inundaciones, aluviones, pérdida de biodiversidad, etc...) son claves para materializar una nueva concepción que esté en sintonía con los paradigmas de crecimiento y desarrollo sin generar consecuencias que generen daños irreversibles a las matrices ambientales.

---

<sup>105</sup> El modelo de sustentabilidad aludido se basa en un modelo que identifica a la cuenca como unidad base de gestión, por lo que el planteamiento comienza con el “manejo de cuencas”, para pasar a una “gestión integrada de cuencas” y posteriormente implementar un “ordenamiento territorial” de la cuenca, por lo que el desarrollo sustentable se prospecta como una propiedad emergente de las acciones anteriores.

<sup>106</sup> Esta orientación está dada mayormente por la Dirección nacional de aguas (DGA), el cual, cuenta con altos recursos económicos y con la facultad resolutoria de establecer las directrices en cuanto a la gestión del recurso agua en todo el territorio nacional. La gestión de cuencas por tanto, está supeditada a las resoluciones de este organismo.

## 8.1. Discusión

Durante siglos el paradigma en Chile, así como en la mayoría de los países occidentales, fue el progreso, y si –desde la revolución industrial hasta los años 80– existió coherencia en los países occidentales en la importancia de llegar al desarrollo pleno (paradigma que se vio con más intensidad en los países en vías de desarrollo) mediante la obtención de dividendos en función de la riqueza natural de cada país; no ha existido la misma concordancia cuando se trata de restringir el uso o la explotación de los recursos renovables y no renovables para la protección de la biósfera.

### 8.1.1. Ingeniería de requerimientos.

En Chile en la década de los años 90 se vio con preocupación el resultado de siglos de explotación intensiva traducido en el avance implacable del desierto y la pérdida de bosque nativo (mucho de él reemplazado por plantaciones para uso forestal), lo cual, hizo variar paulatinamente las condiciones climáticas, desde la disminución de las precipitaciones en un 25 % en el siglo XX en la zona central del país (Sandoval, et al, 1993), hasta la intensificación de las lluvias en la zona norte de Chile. La preocupación del gobierno chileno se tradujo en varios aspectos, como el convenio CONAF – JICA, la promulgación de la ley 19300 y la ratificación del protocolo de Kioto durante la presidencia de Ricardo Lagos Escobar. A partir de estos hechos, se han efectuados innumerables planes de restauración, rehabilitación y revegetación (entre muchos otros) a lo largo de Chile con fondos públicos y privados (Francke, et al, 2008); sin embargo, el éxito de ellos se ha medido únicamente en función de los retornos económicos. La visión economicista aún mantiene secuestrada a una visión sistémica centrada en la naturaleza, prevaleciendo la visión antropocéntrica y mercantilista. Lo anterior se hace patente por el hecho que el gobierno chileno destina menos de US\$ 1/ha a la preservación de las áreas del Sistema nacional de áreas silvestres protegidas de estado (Snaspe)<sup>107</sup>.

En virtud de este escenario, la investigación expuesta constituyó un esfuerzo por presentar una nueva metodología centrada en los servicios ambientales de la restauración de cuencas hidrográficas. Uno de los aportes constitutivos del trabajo implicó por tanto, el diseño de una estructura metodológica que estuviera en sintonía con los aspectos cualitativos y cuantitativos de la restauración de lugares fuertemente afectados por la erosión. La ingeniería de requerimientos por tanto (muy usada en la ingeniería del software y la administración), demostró tener las bases científicas óptimas para ser extrapolada a las ciencias ambientales.

Como primer paso, el análisis de la situación inicial de las microcuencas de trabajo planteó inconvenientes metodológicos debido a que no hubo al inicio del proyecto una minería de datos en función de los análisis requeridos en la actualidad (como SIG), por lo que las bases de datos satelitales se transformaron en las fuentes más fidedignas para analizar en forma cuantitativa el estado real de las microcuencas antes de la implementación del proyecto.

---

<sup>107</sup> El Snaspe lo conforman los “Parques nacionales” que tienen como fin la preservación (de flora y fauna) no permitiéndose la explotación de ningún recurso en su interior; las “Reservas” en las que pueden explotarse en forma sustentable algún recurso siempre y cuando no impacte en las especies vegetales y animales que justifican la preservación de la reserva y finalmente los “Monumentos” que son formación geológicas que por su peculiaridad necesitan ser preservadas de la acción humana. Estas tres formas legales de preservación suman en total un 20 % de todo el territorio nacional en Chile, esto es aproximadamente 14 millones de hectáreas.

El procesamiento de las bases de datos del estado inicial de las microcuencas de trabajo evidenció en forma cuantitativa la erodabilidad existente debido a las pronunciadas pendientes y la pérdida de vegetación por la tala excesiva y los malos manejos efectuados durante décadas por parte de los lugareños quienes mediante el uso intensivo del suelo, sumado a una agricultura monoprodutiva, erosionaron el suelo haciendo que este perdiera su capacidad de generar bienes y servicios. Actualmente Alto Loica tiene – en su gran mayoría– suelos forestales, aunque, con sofisticadas técnicas de regadío se han implementado cultivos de frutilla que son propios de la zona.

Dada las condiciones iniciales del ecosistema en las microcuencas, el paso inicial de la metodología se estructura conjeturando una solución que responda a las necesidades del entorno en función de un tipo de perfil que establezca las directrices que encauzaran la línea de acción. Al inicio del proyecto, el eje rector fue la disminución de la erosión aumentando la cobertura vegetal con el fin de evitar la pérdida de suelo; dado que la investigación está centrada solo en los servicios ambientales no existiendo una valoración económica de los elementos naturales restaurados<sup>108</sup>, se postuló un perfil científico ambiental, muy alejado del paradigma científico–económico<sup>109</sup> debido a que el eje rector de la investigación está centrado netamente en los servicios ecosistémicos de la restauración ambiental de cuencas hidrográficas.

Debido a lo anterior, la metodología plantea como siguiente paso establecer los requerimientos precisos que determinaran los lineamientos de acción; estos fueron propuestos muy fugazmente por el proyecto inicial debido a que los requerimientos en el año 1993 consistían solo en la efectividad de las obras construidas, más que la epistemología de las acciones concretas, de tal forma que muchos aspectos quedaron fuera del proyecto original.

Aun así, es importante señalar que la ingeniería de requerimientos implica la postulación de múltiples alternativas de solución al problema previamente identificado, estableciendo criterios específicos que delimitaran una solución concreta, por lo tanto, los criterios estrictamente funcionales (como los utilizados en el proyecto de 1993) debieron ser solo una parte de los elementos que permitieran elegir la solución puntual. Además, la elección de la alternativa óptima se efectúa con criterios cuantitativos que otorguen un respaldo coherente a la implementación de la solución planteada.

Lo anterior se justifica por el hecho que un aspecto clave es la formulación de los requerimientos (cosa que tampoco se consideró de esta forma en el proyecto original). Debido a que estos no deben ser ambiguos, la solución planteada debe estar justificada con estándares matemáticos que justifiquen su puesta en marcha; justamente para darle solidez estructural y funcional a los requerimientos del modelo, aunque, el análisis visualizo que algunos de ellos son obvios y otros sencillamente no lo son, además estos

---

<sup>108</sup> El proyecto inicial tampoco tenía contemplada una valoración económica. Su fin preciso era comprobar la efectividad de las obras de restauración hidrológica – forestales para disminuir la erosión con la proyección de efectuar una transferencia tecnológica a la población local y a nivel país.

<sup>109</sup> Este paso resulta clave en la investigación, debido a que en Chile los fondos para la ciencia pura (ciencia puramente investigativa con la opción de transformarse en aplicable en años o décadas) prácticamente no tiene financiamiento en Chile; esto debido a que los fondos dados por el gobierno y las universidades (en Chile casi no existe la investigación privada) son escasos por lo que las asignaciones son otorgadas a investigaciones que generen un producto final específico; siendo los más favorecidos aquellos que terminen con patentes comerciables.

como pueden mutar en el transcurso de la investigación deben tener la ductilidad necesaria para adaptarse a las necesidades del proyecto.

En síntesis, el modelo expuesto responde fehacientemente al hecho de la ductilidad de la ingeniería de requerimiento y de su capacidad tanto para adecuarse a diferentes disciplinas como dar respuesta a una metodología cuantitativa e interdisciplinaria, lejana de la ingeniería del software; lugar donde habitualmente es utilizada. Esta metodología es por tanto, adaptable a las ciencias ambientales independiente de su sistema y paradigma

Cabe señalar, que en los 4 pasos básicos, la especificación resulta clave para el éxito del modelo, esto porque una especificación consistente reduce significativamente las posibilidades de error, debido a que una correcta identificación de los requerimientos funcionales y no funcionales impide una corrección de estos, lo cual, podría redundar en un fracaso de la metodología o un retraso debido al costo que implica su corrección una vez efectuados los primeros pasos. Por ello la formulación de los requerimientos –en forma clara y sin ambigüedades que es una de las falencias en que se incurre en la formulación de estos– resulta clave para el desarrollo posterior de la investigación.

El proceso de ingeniería de requerimientos constituye una poderosa arma para reunir la información suficiente para determinar la funcionalidad que se desea alcanzar con el sistema. Sin embargo, la recopilación y sistematización de la información enseñó que se debe contar con excelentes métodos y técnicas para concretar el proyecto, además de una retroalimentación constante, ya que, los requerimientos deben ir respondiendo a las directrices reales que demarque el proyecto.

Así como en la ciencia del software, la ingeniería de requerimientos recopila, analiza y verifica las necesidades de un potencial cliente; en las ciencias ambientales la ingeniería de requerimientos recopila la información y la sistematiza para resolver un problema ambiental específico. La meta en ambos casos es entregar especificaciones de los requerimientos en forma concreta y oportuna para resolver un problema puntual. Apunta por tanto, mejorar en que se visualiza y se resuelve un problema en un sistema puntual

## **8.1.2. Evaluación del modelo y levantamiento de resultados**

### **8.1.2.1. Situación actual de las microcuencas**

La evolución de las microcuencas en las últimas tres décadas ha sido un proceso caracterizado por una recuperación en cuanto a la biomasa forestal y las condiciones edáficas disminuyendo la pérdida de suelo en las zonas reforestadas. Sin embargo, la recuperación o crecimiento de la biomasa se ha visto condicionada por episodios ajenos a las obras mismas, como por ejemplo, la sequía que a partir de los años 60 ha azotado la zona central de Chile, retornando en la primera década de siglo XXI e intensificándose los últimos 5 años.

El desarrollo de la biomasa no ha sido lineal, tuvo un marcado crecimiento en los años 90 para mantenerse estable después del año 2000, esto último implica que las obras tienen un margen de acción y que tienen un límite de acción definido; la microcuencas por tanto, con las obras hidrológico forestales alcanzarán un “peak” de desarrollo arbóreo pero con un límite que establecerá un rango de crecimiento en el proceso de reforestación. Esto último significa que para que las microcuencas hubiesen tenido una restauración mayor a la existente (mayor biomasa, formación de sotobosque, disminución de la pérdida de



suelo, condiciones bioclimáticas, etc.) se debió haber intervenido la zona con obras de mayor impacto no solo consistente en las obras hidrológico – forestales, sino una intervención a gran escala lo que hubiese implicado mayores costes económicos. En síntesis, las obras de restauración tienen solo un margen de acción y un límite máximo de restauración; aunque, en absoluto esto implica que las obras hayan sido ineficaces. El trabajo implementado demostró la eficacia de las obras para obtener claros resultados con el fin de recomponer en parte un ecosistema degradado, pero para obtener una restauración mayor a la existente claramente se necesita una intervención aún mayor.

Lo anterior es visible en análisis cuantitativos de la biomasa vegetal. En la microcuenca 1 puede observarse un aumento continuo pero no lineal lo que se manifiesta por una disminución del factor NDVI a partir del año 1995 para retomar una curva ascendente después del año 2000; esto no implica necesariamente una disminución de la biomasa, sino una disminución de la vigorosidad de la vegetación con lo que hay una respuesta cuantitativa al espectro que resalta el verdor de la vegetación. La microcuenca 2 en cambio exhibe una continuidad en forma acescente hasta el año 2000 para decaer hasta el año 2005, retomando nuevamente una ascendencia hasta el año 2010; las precipitaciones en este caso juegan un rol esencial para la determinación del NDVI (por el motivo anteriormente mencionado), sin embargo, esta microcuenca exhibe el valor más alto del NDVI lo que significa un aumento considerable durante 20 años de la biomasa vegetal producto de la estrategias de reforestación. El análisis cuantitativo indica que esta microcuenca fue la que mejor respondió a los procesos de restauración principalmente por la diversidad y cantidad de obras implementadas.

La microcuenca 3 presenta una menor pendiente en el NDVI lo que significa un menor crecimiento de biomasa en comparación con la microcuenca 2, sin embargo su crecimiento es sostenido no presentando una disminución durante 20 años, lo que significa un menor crecimiento y vigorosidad de la vegetación pero en forma sostenida. La microcuenca 4 en cambio muestra un ascenso y un descenso sostenido a partir del año 2000, lo que significa que –a diferencia de las microcuencas anteriores– la microcuenca 4 no es capaz de sortear los mecanismos erosivos lo que significa que sin las obras de restauración es prácticamente imposible que por sí sola logre restituir la biomasa ni los mecanismos homeostáticos perdidos en la antropización del lugar.

Sin embargo, e independiente de los mecanismos hidrológico – forestales existentes e implementados en los procesos de restauración, el desarrollo de las microcuencas ha estado condicionado por la topografía, red hídrica, tipo de cauces y en general por los elementos geográficos propios del sector.

Los valores calculados para los parámetros morfométricos de los sitios de estudio denotan un sistema hidrogeomorfológico de bajas dimensiones, por lo que se clasifican como microcuencas. La baja extensión de las zonas supone menores tiempos de concentración de la escorrentía superficial y una gran susceptibilidad a experimentar crecidas de corta duración.

La presencia de zonas accidentadas y con una constitución geográfica a base de pendientes en toda el área, indica que todas las microcuencas se activan y aporta agua en forma intensa cuando hay eventos pluviométricos. Además del área, los valores de ancho y longitud de la microcuenca sugieren un sistema de drenaje pequeño pero con un alto poder erosivo en que los cursos de agua que drenan perpendicular y oblicuamente hacia ésta a lo largo de su canal, condicionado por una litología que ofrece poca

resistencia a los procesos erosivos. Los valores del diámetro y del perímetro de las microcuencas también corroboran las pequeñas dimensiones de este sistema.

Las alturas en el área están comprendidas desde los 225 msnm (altura mínima) que corresponde a la cota en la que desemboca en cauce de la microcuenca y los 335 msnm (altura máxima) correspondiente a la cota máxima de la microcuenca 4. La diferencia entre estas dos alturas extremas definen un relieve con una diferencia de altitud de 110 metros que implica alturas y pendientes significativas favorables a la génesis y activación de procesos erosivos y de transporte de materiales.

La altura mediana significa que un 50 % del área de la microcuencas posee valores por encima de esta cota y un 50 % por debajo de ella. En las cuatro microcuencas, los valores de la altura mediana son muy cercanos a los valores de la altura media lo que indica que no hay diferencias abruptas de relieve o presencia de grandes extensiones llanas. Aunque, la inexistencia de fuertes contrastes no implica que no existan procesos erosivos; por el contrario,

Las pendientes topográficas en las microcuenca de Alto loica oscilan entre 0 y 10 grados. En el tramo final del curso de la desembocadura, las pendientes están entre 0 % y 3 % con una plana a suave. En el valle de las microcuencas las pendientes presentan valores entre 0 y 3% con topografías medianas a accidentadas, y en el resto del sector montañoso de la microcuenca las pendientes presentan mayor oscilación definiendo topografías accidentadas a muy fuertes.

Los cursos del cauce principal realizan un recorrido que oscila entre los 0,68 Km (microcuenca 1 y 1,5 Km (microcuenca 3) desde su nacimiento hasta su desembocadura, donde describe un perfil longitudinal que exhibe cambios suaves de gradiente topográfico arrojando una pendiente que fluctúa entre los 2,86 (microcuenca 3) y 7,98 (microcuenca 1) condición que refleja el control de la litología y del relieve en la morfología del mismo. Todo lo anterior indica poca resistencia de la litología a los procesos erosivos.

La morfológica del perímetro de las microcuencas de Alto Loica, evidencia la forma alargada del sistema con una orientación N – S en algunos casos e inclinado hacia oeste en otros; esto se manifiesta por el factor de forma que adquiere valores bajos lo que implica de igual manera una fuerte tendencia al alargamiento. El coeficiente de compacidad muestra valores que define a la forma de la microcuencas como alargada, lo que indica que el agua discurre hacia un solo cauce.

La red de drenaje de las microcuencas está constituida corrientes de agua de corto recorrido solo en época de lluvia y con una longitud total que fluctúa entre los 0,87 Km (microcuenca 1) y 2,69 Km (microcuenca 4). Las microcuencas de Alto Loica tienen un sistema de cauces de orden 2 (microcuencas 1 y 3) y orden 3 (microcuencas 2 y 4), siendo esta indicador un elemento importante de la extensión y ramificación de la red de drenaje, considerando la pequeña superficie del sistema. En todas las microcuencas, los cauces de orden 1 superan el 50% de la red total, lo cual influye en la reducción de los tiempos de concentración de la microcuenca en presencia de lluvias, sin embargo, la baja irrigación de las microcuencas, disminuye la posibilidad que una gota de lluvia alcance un cauce primario tormentas.

El coeficiente de torrencialidad adquiere valores entre 8,92 y 28, 57, lo cual indica una elevada susceptibilidad a la erosión lineal. La relación de bifurcación entre los distintos órdenes de corrientes de la red de drenaje es uniforme solo en la microcuenca 4, con un valor de relación de bifurcación 3,00, lo que indica una actividad erosiva en las microcuenca restantes y la formación de nuevos cauces.

En síntesis, las microcuencas de Alto Loica en San Pedro de Melipilla corresponden a un sistema hidrogeomorfológico de bajas dimensiones de tipo exorreico con orientación Norte – Sur con oscilaciones hacia el Este y Oeste formado por suelos graníticos en la Cordillera de la Costa, cuyas respuestas morfodinámica e hidrológica están condicionadas por la pequeña área del mismo, fuertes pendientes, una densidad de drenaje baja (valor máximo de 9,63 en la microcuenca 2), orden de Horton 2 y 3 de la microcuencas y una relación de bifurcación media de 3,00 (microcuenca 4). En otras palabras, las respuestas de las microcuencas a los eventos climáticos son condicionadas y controladas por las características morfométricas del sistema y de su red de drenaje.

El proyecto CONAF – JICA nunca tuvo un mecanismo que implicara una evaluación cuantitativa de los daños globales generados por décadas de intervención humana, todo levantamiento de información se efectuó en forma aislada analizando cada elemento en forma intrínseca y no holísticamente; esto no constituyó una falencia del proyecto en sí; sino que no estaba establecido en sus objetivos originales ya que el proyecto contemplaba únicamente la factibilidad de las obras de restauración para la disminución de la erosión y su posterior transferencia tecnológica a la población local. El modelo propuesto para la estimación de daños fue calibrado y probado en distintos escenarios. A pesar que el levantamiento de daños se efectúa en forma visual, la cuantificación esta efectuada y calibrada cuantitativamente. En el caso de las cuencas, el modelo heurístico demostró que las microcuencas están con un nivel de daño que fluctúa entre “alto” y “muy alto”.

En el caso de la microcuenca 1 el valor fue 853, lo que indica que está afectada seriamente la resiliencia de los recursos en dicho sector, por lo que solo la intervención en forma sistémica y a gran escala es capaz de revertir el proceso de degradación, además la restauración deberá reinsertar elementos ecológicos que han desaparecido del entorno como por ejemplo, flora nativa. A pesar que en esta microcuencas es donde puede observarse un resultado óptimo en cuanto a la aplicación de zanjas de infiltración, este proceso solo se concretó en un sector reducido de la ladera de exposición este y no en toda la microcuencas, esto porque el proyecto solo contemplo los resultados de las obras y no tuvo como fin la restauración de la microcuenca completa. En cambio en la microcuencas 2, el valor baja a 820 lo que implica un daño de tipo “medio”, esto porque las obras de restauración y reforestación devolvieron determinadas características ecológicas como masa arbórea y la aparición de aves rapaces y micro mamíferos; aunque, la resiliencia no está comprometida del todo, aun se necesita intervención humana para que los mecanismo de restauración naturales logren su óptimo. Comparativamente hablando es en el factor “vegetación” en donde están las diferencias más marcadas entre ambas microcuencas y a nivel de parámetros es en la probabilidad de daño colateral en el cual hay marcadas diferencias aumentando este valor en la microcuencas 1, en comparación a la microcuencas 2; todo esto debido fundamentalmente a la masa arbórea del lugar.

En las microcuencas 3 y 4, los valores cambian a 837 (alto) y 848 (muy alto), respectivamente; alcanzando el valor máximo en esta última microcuenca, en la cual, no

se ha efectuado ninguna intervención por haber sido considerada como microcuenca testigo en el proyecto original. En la microcuenca 3, los daños de la huella humana son visibles a pesar de la reforestación y las obras construidas en el sector norte; sin embargo, aun la microcuenca no puede por sí sola, generar los mecanismos de restauración necesarios para retornar a las condiciones iniciales.

La microcuenca testigo alcanza el valor más alto debido a la inexistencia de planes de manejo y restauración, aquí el modelo indica que está seriamente comprometida la resiliencia de los recursos y que solo una intervención humana sistémica puede generar que el sector retome sus condiciones primigenias. Al igual que en los casos anteriores, los valores indican notorias diferencias en la vegetación y en la compactación del suelo.

Sin embargo, esta situación cambio significativamente después del incendio que afectó a Alto Loica, donde las más afectadas fueron las microcuencas 2 y 3. Estableciendo la aplicación del modelo después del incendio los valores cambiaron de 820 a 841 para la microcuencas 2 variando su estado de degradación de “medio” a “alto” y de 837 a 843 en la microcuencas 3. En el caso de la microcuencas 2, el cambio de estado pasa básicamente porque a diferencia de la microcuencas 3, hubo mayor destrucción de masa arbórea de alto valor ecológico debido al tipo de vegetación quemada y por la frondosidad de los arboles destruidos, lo cual, implicó un severo daño ecológico, además que las obras de restauración hidrológico – forestal resultaron absolutamente destruidas.

#### **8.1.2.2. Análisis de suelo**

El sector de Alto Loica se caracteriza por ser irregular con presencia de lomajes, quebradas, hondonadas, colinas, caracterizándose el alto grado de erosión; la cual se ve favorecida por la geomorfología del lugar.

El suelo de Alto loica se caracteriza por tener pH cercano a neutro en las zonas bajas, lo cual, contribuye positivamente a las propiedades físicas del suelo; esto además impide que la estructura del suelo se vuelva inestable o que la arcilla se disperse, además el pH en los suelos en estudio guarda una relación directa con la CIC, así como con la biodisponibilidad de minerales. En los horizontes superiores el pH es menor debido a la presencia de materia orgánica, sin embargo en los horizontes inferiores es mayor debido principalmente a los minerales y la baja presencia de agua debido a la compactación del suelo y la baja infiltración.

De la misma forma, la materia orgánica en los horizontes superiores favorece la mayor presencia de minerales como B, C y Ca; aunque su concentración disminuye con la profundidad así como su solubilidad debido a la escasa presencia de agua en los horizontes inferiores por la alta compactación del suelo y el clima marcado de la zona lo que ocasiona extensas temporadas sin eventos pluviométricos. En el caso del N –por encontrarse en mayor proporción en los horizontes superiores– la mayor parte de él es arrastrado por la escorrentía (debido al incremento de esta por la escasa vegetación) debido a su solubilidad. De esta forma, la pérdida de suelo en Alto Loica ocasiona el arrastre de minerales en la zona superficial del suelo, lo cual, en el caso del fosforo representa un problema de más alto impacto debido a que en las zonas bajas de las cuencas este elemento viene dado por el arrastre de los ríos provenientes de las zonas altas de la Cordillera de la Andes, cosa que no ocurre en los suelos de Alto loica por encontrarse en la Cordillera de la Costa por lo que sus cauces se forman solo durante las temporadas invernales no existiendo tributarios de los Andes lo que justifica en parte su

aridez y la baja concentración de fósforo en los suelos de las microcuencas con el consiguiente déficit que esto implica para la vegetación. Esto último también es notorio en el caso del B, debido a que en los horizontes inferiores, sus niveles no sobrepasan la 1 ppm; lo cual no supe la cantidad suficiente para el normal desarrollo de las plantas.

Las deficiencias en los niveles de estos minerales, sumado a la deforestación y las extensas temporadas sin lluvia explican en parte la baja fertilidad de los suelos y lo complejo que resulta disminuir los niveles de erosión existentes.

En cuanto a la profundidad de los suelos, ésta resulta influencia por la geomorfología presente en la zona; debido a que la profundidad de los suelos es levemente mayor en las zonas bajas de las microcuencas y menor en las zonas altas, esta diferencia se acrecienta en las laderas y más aún si son pronunciadas, sin embargo, la microcuenca 4 demostró tener el 60 % de su superficie con suelos delgados lo que la hace altamente susceptible a los procesos erosivos. Esto se debe básicamente a que por su geomorfología y la inexistencia de ríos permanentes, la deposición de material ha sido mínima generando suelos pobres para la actividad económica solo aptos para la actividad forestal. En general, este suelo es de baja fertilidad, ligera a moderadamente ácidos, que sufre encostramientos superficiales, típicos de los suelos pardos no cálcicos de la zona central.

En Alto Loica los suelos son básicamente de textura franco arenoso, arena franca, arena limosa y arena arcillosa, esto debido a que la Cordillera de la Costa está compuesta básicamente por rocas graníticas y metamórficas como material original (Laveno y Cembrano, 2008), lo que provoca que sea erosión sea menos severa generando lomajes suaves y menos pronunciados<sup>110</sup>. La Cordillera de la costa es relativamente nueva comparada con otras formaciones geológicas, ya que, se formó en el mesozoico hace 70 millones de años (Barra, et al, 1998), lo cual hace que aun este en meteorización, aunque este proceso ha sido más acelerado en comparación con la Cordillera de los Andes y menos acelerado que en los valles transversales debido a la deposición de material sobretodo en las zonas bajas de las cuencas hidrográficas. En el caso de Alto Loica las zonas bajas están con sedimentos de las laderas erosionadas

Los suelos son muy delgados a moderadamente profundos con una pedregocidad en promedio moderada y de características áridas y secas en las zonas más profundas. Su densidad aparente es media en el horizonte superior y muy alta en los horizontes más profundos<sup>111</sup>; esto implica que la cantidad de agua infiltrada sea más baja en comparación a suelos más porosos. Las texturas de los horizontes superiores son livianas a medias, con abundante grava de cuarzo. A continuación, presentan horizontes arcillosos más densos y compactos, también con abundante grava de cuarzo y descansan en materiales granitoídeos altamente intemperizados, con abundantísima grava de cuarzo.

Presentan actualmente, en su gran mayoría, una muy fuerte erosión de manto o zanjas. Una presencia de una capa más densa y compacta subsuperficial en un suelo suelto

---

<sup>110</sup> Esto es contrario a lo ocurrido en la Cordillera de los Andes, ya que el material original es básicamente a base de andesítica, la cual, tienen una erosión más “violenta” generando riscos, peñascos, desfiladeros y una conformación geográfica que hace más difícil el asentamiento humano.

<sup>111</sup> Los criterios cualitativos indicados en este párrafo corresponden a la clasificación dada por Schlatter y colaboradores (2003) en función de la clasificación de parámetros numéricos cuantitativos obtenidos en terreno.

origina socavamientos de la parte suelta y un desplome de la más densa que produce esa erosión de zanjas tan típica de los suelos residuales graníticos.

Estas características, sumado al hecho que aquí no existen cauces permanentes y las estaciones son marcadas con largas temporadas sin lluvias, explican porque la flora nativa solo se haya restringido a árboles esclerófilos con capacidad de soportar largas temporadas de sequía. Por esto además, los suelos se catalogan como suelos tipo VI quedando solo aptos para actividad forestal con un bajo rendimiento agrícola.

Los usos dados a esta zonas, más la deforestación y las características propias de los suelos (pendiente, las características específicas de infiltración, el material de origen, entre otros) ha ocasionado que el área se encuentra muy degradada presentando erosión muy severa caracterizada por la presencia de numerosas cárcavas, presencia de pedestales y pavimentos de erosión, y pérdida de suelos en un 80% dejando al descubierto el horizonte B, sobre todo en las laderas. Esto se condice con el análisis del NDVI del año 1990 (antes de la implementación del proyecto CONAF – JICA) en que se puede observar un alto grado de erosión (color amarillo) en todas las microcuencas, acrecentándose en las partes altas de las laderas y con una forma convexa. En estas partes existe presencia de subsuelo y ausencia de vegetación y la formación de canalículos y zanjas.

La exposición de las laderas (elemento muy común en la geomorfología de Alto Loica ya que básicamente está compuesto laderas y quebradas) es uno de los factores preponderantes para el desarrollo de la erosión. En terreno las laderas con exposición Norte manifiestan un grado erosivo más alto que las con exposición Sur; las laderas de exposición Oeste, también muestran un avanzado grado erosivo. Aunque en 1990 la vegetación es bastante reducida, esta se restringe solo a restos de vegetación esclerófila remanente de las antiguas formaciones existentes antes de la intervención humana y solo están limitadas mayormente a los cauces,

En los suelos de Alto loica puede observarse abundante grava de cuarzo, con horizontes subsuperficiales densos y duros con colores pardos y rojizos en las zonas más profundas. Los sedimentos que se encuentran en el fondo de las laderas son de la clase arena y grava con poco material fino y no tienen estructura desarrollada.

Hay oxidación en estos suelos por el cambio anual del equilibrio hídrico. Los primeros horizontes presentan óxidos naranjos de fierro y sus colores son pardo a pardo – amarillo con variaciones en diferentes sectores de las microcuencas, por ejemplo, en la microcuenca 2, la parte media de las calicatas tienen colores que son más rojizos que los colores de arriba y abajo, que son más amarillentos.

Hay una abundante presencia de cuarzo en todos los perfiles de las microcuencas y una existencia de óxidos Fe en forma de manchas en el horizonte inferior, mientras que los horizontes superiores son densos y arenosos por los daños de la erosión y con poca estabilidad. Por la arcilla se desarrollan estructuras prismáticas en las cuales crecen los raíces en forma vertical y horizontal. La consistencia de estos suelos es duro - muy duro por el fuerte resecamiento de los suelos.

Respecto de la fertilidad del suelo, la humedad es muy baja (CAA 15 – 18 %) debido al porcentaje de agua no aprovechable por las plantas debido a la presencia de arcilla, y poca retención de agua debido a la presencia de arena; aunque la capacidad de campo

supera el 30 % en algunos puntos; las características del suelo solo lo hacen aprovechable como suelo forestal.

Esto último limita a su vez, la presencia de actividad microbiología, la cual, se restringe a una mayor actividad en la rizósfera de los arboles donde la actividad micótica y microbiana es mayor que en los suelos descubiertos. Las diferencias notorias existentes en la rizósfera de árboles autóctonos y árboles nativos, permiten inferir que el tipo de árbol limita el tipo de microorganismos existentes debido a la selección que se efectúa en función de los exudados radiculares liberados por la vegetación existente. Esto implica una diferencia muy marcada, tanto en la comparación de la rizósfera de un árbol autóctono con un árbol nativo, así como un árbol nativo con un suelo degradado. Esto implica que la erosión cambia drásticamente la composición microbiana de un suelo, alterando o modificando las actividades ecológicas desarrolladas por las comunidades bacterianas de un determinado suelo.

### **8.1.2.3. Modelación analítica empírica de zanjas de infiltración**

Los modelos están basados en una conceptualización de los flujos de entrada y salida de agua en las zanjas de infiltración con el supuesto inicial que las zanjas trabajan como un sistema integrado en una pendiente en el cual, hay interconexión entre otra no solo por la tarea ecosistémica que realizan en un determinado ecosistema, sino que se asume una interconectividad a través de los flujos de salida por infiltración, los cuales hacen factible el desarrollo de modelos integro – diferenciales globales y no por zanjas independientes.

El modelo dinámico para un sistema en cascada de 3 zanjas, se basa en un modelo integro – diferencial de primer orden para flujos de salida de la primera zanja, de segundo orden para las salidas de la zanja 2 y una ecuación diferencial más compleja de tercer orden para las salidas de la zanja 3. Por ello, se proponen modelos dinámicos en variables de estado.

Se observa que para “n” zanjas en modalidad escalera (y siempre que alguna salida de zanja anterior alimente la zanja siguiente) nacen los modelos de orden “n”, tanto diferencial como de variables de estado.

En cambio, los modelos para flujo se utilizan directamente para obtener los respectivos modelos de altura de zanjas. En esta modelación, las zanjas son genéricas, pudiéndose separar, bajo determinados acondicionamientos del diseño, las variables de interés a investigar. En este caso, se clasifican/separan las salidas de flujo de infiltración más escorrentía de los flujos de evaporación y evapotranspiración, los que son respectivamente calculables como un porcentaje ponderado por constantes definidas por el modelo.

### **8.1.2.4. Modelo de red neuronal**

Cabe consignar que los valores de ajuste del modelo fueron en función de árboles con y sin asociación a zanjas donde el promedio de carbono fijado en árboles sin zanjas fue de 25,96 Kg C/árbol; mientras que el individuos asociados a zanjas el promedio fue de 138,8 Kg C/ árbol. La extrapolación de estos valores significa que con zanjas el carbono promedio fijado es de 111,04 Ton C/ha; mientras que sin zanjas el carbono promedio es

de 20,76 Ton C/ha<sup>112</sup>. El modelo por tanto se basa en estándares basados en estos valores. A diferencia de otras especies, los eucaliptus<sup>113</sup> no asociados a zanjas presentes en las microcuencas mueren al cabo de algunos años o simplemente no alcanzan alturas superiores a los 10 metros, en cambio, los árboles asociados a zanjas no solo alcanzan alturas de 14 metros en promedio, sino que además, presentan mayor longevidad en comparación a los otros individuos sin zanjas; de esto se infiere que las obras de infiltración no solo aumentan la biomasa de los árboles, sino que además incrementan sus años de vida.

Respecto al modelo propiamente tal, la red Cluster acertó en un 100%, aun así, este acierto es con respecto al promedio de carbono para las distintas combinaciones de vectores y no al valor específico. Esto presenta una limitante al ingresar vectores de entrada nuevos y muy distintos a los de entrenamiento.

La red Backpropagation por el contrario que la red Cluster, entrega datos numéricos más precisos y especializados con respecto al vector de entrada, dando una mayor flexibilidad al momento de ingresar casos nuevos, justamente lo contrario a la red Clúster.

El resultado de la red con Base Radial muestra un complemento a la red Backpropagation en los casos donde el carbono tiene mayor valor, pero tiene peor respuesta para carbono con menor valor. Las redes neuronales utilizadas observan los mismos patrones en ambos casos de codificación.

La red Base radial tiene mejor acierto en los vectores de combinación 1 y combinación 3. La red backpropagation tiene mayor acierto para los vectores de combinación 2 y combinación 4. Se propone utilizar ambos modelos ya que el error porcentual llega al 28%, es decir, un 72% de acierto.

## 8.2. Conclusiones

- a) *Evaluar los efectos de los tratamientos de restauración ambiental en las coberturas vegetacionales y suelos erosionados basados en la evolución de las microcuencas hidrográficas de Alto Loica con y sin obras de restauración hidrológico – forestales.*

La evaluación y cuantificación de los valores del NDVI demostraron un incremento de este valor durante 20 años cuando hay obras hidrológico – forestales presentes; ya que, su aumento no es sostenido, o presenta bajas, cuando las obras de restauración están ausentes. En el caso de la microcuenca 1, el valor de NDVI pasa de 0,09 a 0,20 en 20 años, lo que significa un incremento cuantitativo de la vegetación existente en la microcuenca; sin embargo, el valor mas alto se alcanza en la microcuenca 2 alcanzando un valor de 0,23 (con un valor inicial de 0,06 en 1990); y en la microcuenca 3 su valor sube de 0,09 a 0,2 en 20 años. El aumento de este valor muestra un incremento tanto de la vegetación como de su vigorosidad en un lapso de 20 años, teniendo leves descensos en la década de los 90 producto de la sequía que azotó la zona central del país.

---

<sup>112</sup> Calculos efectuados según el protocolo de implementación de zanjas en la microcuenca 1

<sup>113</sup> El modelo se hizo en función de esta especie debido a que la implementación de zanjas de infiltración en la microcuenca 1 se efectuó con esta especie, además, fue la que presentó resultados más notorios. Junto con ello, el grupo control se efectuó con eucaliptus que no habían sido asociados a zanjas y que habían sido plantados en idéntico tiempo; lo cual permitió controlar la variable tiempo.



En la microcuenca 4 en cambio (en la cual no fue implementada ninguna obra de restauración por tratarse de la microcuenca testigo), el NDVI tuvo un leve ascenso (producto de las lluvias se forma una capa vegetal pero restringida al cauce principal), sin embargo, este cae logrando un valor máximo de 0,11, lo que indica que la microcuenca no tienen los niveles de biomasa que si exhiben las otras microcuencas de trabajo.

Esto indica que un determinado ecosistema (las microcuencas en este caso experimental) es incapaz por si solo de responder o hacer frente a los procesos erosivos y tampoco es capaz por sí mismo de reordenar y reestructurar las condiciones ecosistémicas y bioclimáticas iniciales cuando ha sido fuertemente intervenido. El grado de antropización por tanto afecta fuertemente las relaciones existentes al interior de la microcuenca, ya que, esta se encuentra ordenada en forma natural, por tanto, la intervención rompe los nexos ecológicos hasta un punto en que la microcuenca es incapaz de reordenarse por sí misma. Esto implica que al desestabilizarse el equilibrio holístico de la cuenca, es afectada por procesos como erosión, pérdida de suelo, crecidas, etc. Las obras de restauración tienen como objetivo, impedir estos fenómenos, ya sea, aumentando la infiltración, disminuir los torrentes, evitar la pérdida de suelo, etc. Por ello, la proporción de biomasa en una microcuenca es directamente proporcional a las obras de restauración implementadas en ella. Se puede afirmar categóricamente por tanto, que las obras de restauración hidrológico - forestales, favorecen el establecimiento y crecimiento de las plantaciones forestales en el secano costero e interior de la zona árida y semiárida de Chile, debido a la eficiencia en la captura de humedad (como las zanjas de infiltración), lo que conlleva a obtener crecimientos más rápidos y sostenidos en lugares con suelos degradados; donde, jamás se esperarían estos resultados sin la intervención humana. Este estudio refleja la importancia de la aplicación de técnicas de conservación en plantaciones forestales, lo cual, se traduce en un aumento de la biomasa y por ende en un incremento de la productividad de la plantación.

La metodología utilizada siempre tendrá elementos que mejorar, hecho totalmente válido, si se considera que no existen vías de solución de problemas totalmente definidos; por ello, la metodología usada para la concreción de este objetivo constituye una proposición de diseño hidrológico aplicable a las zonas de secano y semiáridas de Chile, la cual en la práctica ha demostrado ser confiable en sus resultados y viable en su aplicación.

*b) Realizar una identificación, delimitación y caracterización mediante variables físicas y ambientales de las microcuencas hidrográficas de Alto loica, en función de las bases de datos disponibles, en bases de sistemas informáticos (georreferenciados, redes, grillas.) para la obtención de indicadores de sustentabilidad.*

Al comienzo del proyecto CONAF JICA no existían muchos de los elementos de levantamiento de información existentes hoy (Arcgis, Google Earth, etc.). Por ello, no se contó con información de este tipo al momento de comenzar el proyecto; sin embargo, las herramientas informáticas existentes permitieron levantar información desde el año 1990 con lo cual se recurrió a todas las fuentes posibles para la obtención de información, las cuales, procesadas con software específicos permitió lograr este objetivo logrando delimitar las microcuencas.

Los indicadores propuestos (Amplitud geográfica, Reversibilidad, Probabilidad de daño colateral, Impacto poblacional y Consecuencia) en el modelo fueron cuantificados en las microcuencas alcanzando valores que fluctuaron entre los 820 y 853, los cuales variaron

a 841 para la microcuenca 2 (cuyo valor inicial era de 820) y 843 para la microcuenca 3 (valor inicial 837) después del incendio que asoló a Alto Loica; ello significa que el modelo respondió a las variaciones ecológicas generadas en las microcuencas.

El análisis de las variables físicas permitió a su vez el análisis mediante el desarrollo de un modelo heurístico que sirvió de base para el establecimiento de indicadores que una vez cuantificados en terreno sirvieran de base como indicadores de sustentabilidad al analizar variables como impacto geográfico, probabilidad de daño colateral, reversibilidad, etc. Por ello, la posibilidad de establecer parámetros de sustentabilidad que permitan cuantificar las variables previamente definidas constituye una poderosa herramienta para establecer planes futuros de restauración.

c) *Caracterizar las propiedades físicas, químicas y microbiológicas del suelo y estudiar el comportamiento hidrológico – ambiental de las microcuencas hidrográficas de Alto Loica.*

El análisis integral de los suelos de Alto Loica se efectuó cumpliendo con los estándares previamente definidos en el capítulo 5 del presente trabajo. Las características físicas denotaron la conformación y estructura del suelo en función de parámetros estandarizados y cuantificados. La importancia fundamental se expresa en que estas características son claves para la estimación y aplicación de los estándares de restauración debido a que la respuesta a los procesos de reforestación y aumento de la biomasa estarán condicionadas por las cualidades del suelo, ya que, sus características físicas son claves para la recomposición de las conexiones ecológicas de la microcuenca. El análisis de los componentes químicos, en cambio, se relaciona con la respuesta específica de la biomasa, es decir, el crecimiento y vigorosidad de la vegetación está íntimamente relacionada con la constitución química de los suelos. Alto Loica está emplazada en la Cordillera de la Costa, sus suelos son graníticos y el material químico del suelo está dado solo por el material de origen, debido a la inexistencia de grandes ríos que depositen material procedente de otras cuencas (como ocurre con los ríos procedentes de la Cordillera de los Andes). Por este motivo es clave cuantificar los elementos químicos y para determinar cuan determinante será la respuesta del suelo a los procesos de restauración y cuáles son las especies arbóreas más aptas para los suelos de secano con las características anteriormente citadas. Cabe destacar el análisis microbiológico, el cual, indicó que la microbiota de los suelos de secano es altamente susceptible al cambio de condiciones (por ejemplo: erosión); debido a que cambian las condiciones ecológicas del suelo cuando este pierde su capa vegetal; las especies microbiológicas del suelo cambian su constitución debido a que las condiciones de los suelos están fuertemente condicionadas con las características ecológicas de la rizósfera, por ejemplo, el “R estadístico” indica una variación máxima (valor 1) al comparar la microbiota de la rizósfera de un peumo, con lo cual se indica que las variaciones poblacionales tanto de bacterias como de hongos son máximas cuando la vegetación autóctona es reemplazada por vegetación exótica, lo mismo ocurre cuando el suelo es erosionado, ya que las variaciones son de 0,815 al comparar suelo desnudo con la rizósfera de un eucaliptus y 0,778 si la comparación es entre suelo desnudo con un peumo.

Al alterarse las condiciones ambientales, las relaciones en la interacción microbiota–suelo cambian sustancialmente lo que se traduce en una diferencia microbiológica altamente notable entre la rizósfera de un árbol nativo, un árbol exótico y un suelo erosionado. Finalmente, el desplazamiento del agua en el suelo también es un factor determinante

cuando se hacen las estimaciones sobre planes de restauración, debido a que la biomasa está fuertemente condicionada por este factor.

- d) *Diseñar un modelo integro – diferencial para estimar el comportamiento de las obras de restauración hidrológico – forestal, específicamente, las zanjas de infiltración.*

La implementación de modelos requiere de acondicionamientos estructurales y de estimación de flujos de entrada. Por ello, los modelos desarrollados son modelos empíricos u orientados a la simulación e investigación para validar y optimizar el modelo de zanjas de infiltración. Los modelos son siempre perfeccionables, particularmente mediante sintonía de parámetros en la fase experimental del diseño de zanjas.

Los modelos matemáticos propuestos permiten explicar el funcionamiento dinámico de un sistema de zanjas, lo cual, permite explicar su funcionamiento como sistema integrado en una cuenca hidrográfica.

- e) *Proponer un modelo para estimar la fijación de carbono en las microcuencas hidrográficas del sector Alto Loica.*

Los modelos son representaciones de la realidad; por ello se formuló un modelo planteado en función de cuatro variables en base a un mecanismo de ajuste de parámetros denominado “redes neuronales artificiales”. En este modelo fue clave la presencia/ausencia de zanjas de infiltración, ya que, la biomasa está condicionada a la presencia de obras de restauración, según lo indicado al inicio de este apartado. Por ello, el modelo cumplió con un 72% de certeza ocupándose tres redes distintas considerando además el tipo de suelo como un variable preponderante.

El modelo en cuestión fue creado y planteado para determinar la biomasa de eucaliptus en condiciones climáticas de secano de la zona central de Chile donde los valores de carbono capturado fluctúan entre 25,96 Kg C/árbol (sin zanja) y 138,8 Kg C/ árbol (con zanja). El modelo propuesto varía sus rangos entre estos valores permitiendo extrapolar el carbono fijado en la biomasa en las zonas de secano de la zona central de Chile; aunque en futuras investigaciones es absolutamente factible sumar nuevas variables que disminuyan el rango de error y aumenten el porcentaje de certeza. Al comenzar un proceso de restauración (que puede tardar años), la multiplicidad de variables y supuestos que interrelacionan no permiten asegurar con certeza si se cumplirán o no los requerimientos u objetivos planteados en el plan previamente definido; sin embargo, los modelos propuestos permiten inferir cuanto carbono capturará un árbol cuando se cuantifiquen determinadas variables como las estipuladas en el modelo. Por ello resulta una herramienta que tiene como fin disminuir la incerteza ante futuros planes de restauración en Alto Loica o en toda la zona semiárida de Chile central.

### **8.3. Aplicaciones prácticas**

Entre los problemas ambientales<sup>114</sup> existentes en Chile, la erosión y degradación de suelos constituye el de mayor gravedad a nivel nacional (Francke, et al, 2004) debido no solo a las consecuencias económicas, sino a las implicancias sociales que esto conlleva. Esto se debe básicamente a que los modelos de desarrollo en Chile así como en América latina han sido modelos no sostenibles centrados en el paradigma del crecimiento

---

<sup>114</sup> No confundir con “conflicto ambiental”.

económico que han contribuido a la degradación de vastas áreas boscosas así como la disminución progresiva de los recursos naturales. Respecto a esto último, la deforestación (por motivos de sobreutilización agrícola, incendios, pastoreo, etc.) presenta en muchos casos una connotación asociada a la pobreza rural<sup>115</sup>.

Los ecosistemas forestales cumplen una labor de protección y conservación (de suelos y aguas), otorgan protección al suelo en cuanto a la cobertura vegetal (ante otras alternativas de uso de la tierra) por lo que representan un elemento central para evitar los procesos de degradación de tierras (Francke, et al, 2008). Considerando lo anterior, el fomento y manejo forestal sostenible de los bosques contribuye en la regulación del ciclo hidrológico estabilizando las cuencas hidrográficas, aumentando la infiltración del agua en el suelo y aportando agua (en cantidad, calidad, tiempos adecuados y oportunos) a las comunidades rurales (Francke, et al, 2008)

Por otra parte –a nivel global– las alteraciones naturales y antrópicas del medioambiente inciden en la estabilidad de las cuencas hidrográficas, expresándose en graves manifestaciones, como por ejemplo, inundaciones, sequías y fenómenos hidrometeorológicos extremos. Todo ello, en un contexto de procesos evidentes de alteraciones climáticas (Francke, et al, 2008).

La restauración de cuencas hidrográficas representa un equilibrio entre el crecimiento económico y la equidad social, de tal forma de alcanzar y armonizar el progreso económico y la gestión ambiental en lugares donde hay asentamientos humanos interaccionando con territorios susceptibles. La evolución de la empresa forestal, así como la importancia que esta tiene en la económica nacional han puesto en primer orden la componente económica del manejo y gestión forestal para la recuperación o rehabilitación de zonas con suelos degradados.

Si bien han habido cambios en el énfasis productivo (desde una visión “productiva clásica” de los años setenta, a una más “social” en los noventa), el cambio de siglo agregó un fuerte componente de protección ambiental a partir de la década del 2000 centrado hacia el desarrollo sostenible debido a los alcances económicos, socioculturales y políticos del recurso forestal, lo cual, exige contar con mecanismos sistematizados para la recuperación de cuencas hidrográficas

Dado lo anterior, el modelo planteado en esta investigación puede ser aplicable en la recuperación de biomasa arbórea (con fines forestales) considerando que el sector forestal chileno se sitúa como el segundo mayor exportador de divisas después de la minería del cobre. La potencialidad de la empresa forestal es inviable a largo plazo si no hay políticas ni mecanismos sistematizados que permitan la recuperación de cuencas que han sido explotadas para plantaciones, más aun considerando las graves sequías que en Chile se arrastran desde la década del 60.

Los bosques representan uno de los principales sumideros mundiales de carbono, ya que, contribuirán significativamente a la “captura de carbono”. Se estima un almacenamiento de 289 Gton de carbono en la biomasa forestal (biomasa arbórea, la madera muerta, hojarasca y el suelo) lo que resulta significativamente más – en su conjunto – que todo el carbono presente en la atmósfera (Francke, 2008). A nivel mundial, se estima que las reservas de carbono en la biomasa forestal descendieron en 0,5 Gton al año en el período

---

<sup>115</sup> Este fenómeno es muy común en la zona sur de Chile principalmente en las comunidades mapuches.

2000 – 2010, debido principalmente a la reducción de la superficie forestal (Francke, 2008).

Dado que el trabajo está centrado en la captura de carbono; los mecanismos planteados en el modelo propuesto, contribuirían no solo a la reforestación de una cuenca hidrográfica con fines productivos, sino, a la captura de carbono. Este proceso asumiría por tanto, un rol eminentemente basado en los servicios ambientales, potenciados por el modelo planteado en este trabajo. Esto último se basa en la biomasa arbórea formada en las microcuencas en restauración, en las cuales, los valores comparativos del NDVI entre los 1990 y 2010 muestran claramente un aumento sustantivo de la biomasa y cobertura vegetal, los valores del NDVI pasan de 0,09 a 0,21 en la microcuenca 1; 0,06 a 0,22 en la microcuenca 2; 0,08 a 0,20 en la microcuenca 3 y solo de 0,07 a 0,10 en la microcuenca 4. El aumento cuantitativo de este factor indica claramente que los procesos de restauración y reforestación contribuyen significativamente a un aumento de la masa forestal; por ejemplo, los árboles plantados en sectores sin obras alcanzan en aproximadamente una altura de 8 metros; mientras los arboles de la microcuenca 1 con zanjas de infiltración alcanzan los 14 metros. Estos resultados indican que el modelo presenta la factibilidad de aplicarse a otras zonas del sector semiárido de Chile.

Otra área productiva importante en la económica chilena es la minería, la cual, representa la principal fuente de ingresos en Chile generando el 14,2 % del PIB chileno (Sofofa, 2015) y concentrando aproximadamente el 57 % de las exportaciones de esta industria<sup>116</sup> (Sofofa, 2015). Sin embargo (paralelamente a la importancia económica de este sector) la minería es una de las actividades económicas más invasivas ocasionando un impactos ambientales negativos en las zonas donde esta se lleva a cabo (Memoria chilena, 2015). La destrucción de las cuencas, la creación de tranques de relave, los altos consumos de agua y la emisiones generadas en forma de riles y gases, no solo generan la destrucción de los ecosistemas circundantes, sino que además producen una contaminación que produce consecuencias durante décadas en la población cercana<sup>117</sup>.

Un ejemplo de restauración de una cuenca afectada por la actividad minera es la reforestación efectuada sobre los tranques de relave de la mina El teniente<sup>118</sup> en la sexta región. Este tranque fue resultado de la minería del cobre en la Cordillera de los Andes, sin embargo, la forestación efectuada en el lugar permitió recuperar el lugar aumentando la biomasa forestal con los consecuentes servicios ambientales que ello genera. Esta reforestación permitió disminuir la escorrentía superficial y evitar el movimiento de los metales pesados presentes en el suelo.

La minería es un actividad necesaria y seguirá siendo necesaria, además, es temporal y “per se” difícilmente sustentable<sup>119</sup>. Aun con estas limitantes, eliminar en forma absoluta la actividad minera como lo plantean ciertas líneas del ecologismo radical es una utopía

---

<sup>116</sup> Está presente en 13 regiones del país

<sup>117</sup> Esto es significativo en la región de Antofagasta en la zona norte de Chile. Los estudios llevados a cabo infieren que las emisiones de metales pesados generados por la industria minera son los causantes del aumento sostenido de cáncer en la población, teniendo esta región la tasa más elevada de esta enfermedad en el país.

<sup>118</sup> Anaconda Copper Company, actual Codelco.

<sup>119</sup> SEMINARIO en formación docente en sustentabilidad y docencia

para un país que mueve su economía en torno a esta actividad. Por ello, la ley de bases generales del medio ambiente de 1994, así como la implementación de sistemas integrados de gestión ambiental bajo la norma ISO 14000, han servido tanto para la mitigación de la actividad, así como para conservar y restaurar zonas altamente impactadas por la minería. Es en este último punto donde se centra la importancia de este trabajo.

La forestación del antiguo tranque de relave de la mina el Teniente constituye un ejemplo de restauración en zonas altamente impactadas por la minería con resultados sorprendentes; por lo tanto, la extrapolación de esta experiencia a otras zonas del país igualmente afectadas por la actividad minera restaurando las cuencas hidrográficas que estén afectadas como resultado de la explotación de minerales resulta (a la luz de los resultados de El Teniente) altamente viable con una alta expectativa de restaurar y rehabilitar zonas que han sufrido la pérdida de suelos, biomasa vegetal y la homeostasis ambiental.

#### **8.4. Investigaciones futuras**

Tal como se planteara en los capítulos anteriores, la degradación del suelo es uno de los grandes problemas en la actualidad sobre todo en los países subdesarrollados (Francke, et al, 2008), lo cual se genera como consecuencia de la implementación de malas prácticas agrícolas, sobrepastoreo o tala indiscriminada (entre otros) así como la contaminación producto de la actividad industrial (Ulrici, 2000). Respecto a esto último, una de las actividades más comunes es la contaminación por hidrocarburos, ya que, frecuentemente el destino final de estos elementos son los cuerpos de agua y/o el suelo (Iturbe-Arguelles, et al, 2005).

La restauración o recuperación de suelos dañados, ya sea por contaminantes, incendios forestales o erosión es un problema de primer orden que requiere soluciones urgentes debido a las implicancias ecológicas, sociales y económicas que ello conlleva. La capacidad del suelo de generar bienes y servicios constituye la base de la sociedad y una de las principales fuentes de ingreso del PIB; por ello, el restablecimiento de las condiciones o la restitución del potencial de éste, en base a la restauración o rehabilitación puede efectuarse mediante dos aproximaciones: (a) la ingenieril, que es la vía utilizada en casos de degradación extrema y cuando otras posibilidades son inviables o extremadamente lentas o bien cuando se dispone de cuantiosos recursos para la recuperación; y (b) la ecológica, la cual, tiene en cuenta los procesos que se desarrollan de forma natural en el suelo para conseguir a través de ellos, la inmovilización, transformación o degradación de los contaminantes (Araya, 2009). En el ámbito de este último punto, el uso de bacterias para restaurar suelos contaminados por hidrocarburos es una técnica bastante usada en la actualidad. En el derrame del Exxon Valdez en la bahía príncipe Williams en Alaska en 1989 el 50 % de los 350.000 toneladas de crudo vertido al mar fueron eliminadas mediante biorremediación en un lapso de 3 años (Henry y Heinke, 1999).

Los resultados obtenidos en cuanto al análisis bacteriano de los suelos de Alto Loica evidenciaron que la población tanto de bacterias como de hongos se modifica sustancialmente cuando el suelo está erosionado, de la misma forma, su conformación cambia en la rizósfera de los árboles exóticos en comparación a los árboles nativos, lo cual, significa no solo un cambio en la población, sino que se presume un cambio en la ecología de la rizósfera y su función en el ecosistema edáfico. Los resultados del "R

estadístico” es 0,815 para una diferenciación entre bacterias de suelo erosionado y bacterias de la rizósfera de eucaliptus; 0,778 entre bacterias de suelo erosionado y rizósfera de peumo y 1,000 entre bacterias de la rizósfera de peumo y la rizósfera de eucaliptus. Esto indica que independiente de la especie arbórea, la constitución de bacterias del suelo cambia drásticamente cuando un suelo es intervenido, lo cual, queda evidenciado en el NMDS bacteriano

Esto significa que la rizósfera es una compleja fuente que varía química y morfológicamente en interacción con la microbiota del suelo encargada de la mineralización de la materia orgánica (Julca, et al, 2006), estimulando a su vez, el crecimiento de las plantas (Moreno, et al, 2013). En síntesis –y aunque invisibles– los microbios del suelo son esenciales para los ecosistemas por su participación en procesos tales como los ciclos de carbono y de otros nutrientes (Hawkes, 2003)

Las bacterias –por su un rol fundamental– han sido utilizadas desde los estudios de Beckmann y Zobell en las décadas del 20 y 40 respectivamente en estudios de biorremediación de suelos (Rodríguez y Sánchez, 2001) dado que han demostrado tener un potencial que puede ser utilizado en la recuperación de suelos afectados por incendios o erosión. Por ejemplo, las técnicas de eliminación de contaminantes producidos en el suelo tras un incendio forestal, se basan en el uso de bacterias que degradan los compuestos tóxicos y facilitan el crecimiento de la vegetación; esto mediante la selección de bacterias capaces de degradar los compuestos resultantes tras un incendio (Sanz, 2012). Otro ejemplo lo constituye, la restauración de suelo en los sectores rurales de los municipios de Anorí, Cáceres, Taraza y Puerto Valdivia, en las estribaciones de la cordillera Central y el valle del río Cauca en Colombia. En dichos sectores, el gobierno colombiano uso por años el glisofato para la eliminación de las plantas de coca como forma de combatir el narcotráfico; sin embargo, este compuesto afectó severamente el medioambiente por lo que amplias hectáreas de suelo perdieron nutrientes y capacidad agrícola; además, los químicos afectan severamente las poblaciones microbianas en los suelos (Richter, et al, 2011)

Sin embargo, la aplicación de la bacteria *Bacillus subtilis* en cultivos con plantas de cacao, produce la generación de carbonatos de calcio fortaleciendo el suelo, permitiendo mejorar la fertilidad, la aireación, infiltración de agua y nutrientes reduciendo la presencia de aluminio y mejorando con ello las condiciones del suelo (Escobar, 2015). En síntesis, la bacteria calcificante, estabiliza la estructura del suelo propiciando el crecimiento de otras plantas y mejorando con ello la fertilidad; esto además genera una retroalimentación en el suelo, debido a que la presencia y aumento de elementos orgánicos contribuye significativamente al aumento del metabolismo microbiano en el suelo (Ramírez, et al, 2013); y estas a su vez pueden contribuir a acelerar el proceso de acumulación de materia orgánica (Cariello, et al, 2007)

En forma análoga, las costras biológicas del suelo (CBS), las cuales están constituidas por una asociación entre partículas de suelo, cianobacterias, algas, hongos, líquenes y briófitos (Castillo, et al, 2011) han demostrado una alta eficiencia para biorremediar el suelo afectado por metales pesados. Podrían por tanto, utilizarse para recuperar suelos erosionados generando con ello una nueva línea de investigación que conlleve a la aplicación de revolucionarias técnicas que permitan restaurar suelos erosionados para que estos logren recuperar su potencial para generar bienes y servicios además de recuperar las condiciones ecológicas del medio ambiente; esto implica un enorme potencial aún por descubrir debido a que los suelos presentan una inmensa diversidad

poco explorada debido al carácter no cultivable de una gran cantidad de microorganismos, ya que solo entre el 0,1 a 10% de las bacterias son cultivables (Escalante, et al, 2004).

Las CBS sin embargo, no se distribuyen de manera uniforme y son vulnerables a los cambios como por ejemplo incendios y cambio de uso de suelo demorando décadas en regenerarse (Hawkes, 2003); aun así, su presencia favorece la germinación de semillas, entre otros bioprocesos. La costra biológica del suelo (CBS) es un componente complejo del ecosistema que engloba diferentes organismos presentes en las primeras capas de suelo siendo abundante donde la cobertura de plantas vasculares es escasa, como los ecosistemas áridos y semiáridos donde la CBS tienen un mayor desarrollo y puede contribuir notablemente en términos de cobertura (Elbert et al. 2012).

Las CBS crecen en suelos desnudos y pueden contribuir significativamente a estabilizar el suelo y disminuir la erosión reduciendo la energía erosiva de la escorrentía superficial y disminuir el impacto de la gota de lluvia; por tanto, la complementación de esta técnica con las obras hidrológico – forestales puede llevar al aumento de la cobertura, además de potenciar el crecimiento de las herbáceas aplicando las técnicas microbiológicas como las CBS.

Estas además, establecen zonas seguras donde las condiciones de humedad y nutrimentos son favorables para la germinación de semillas. No obstante el efecto positivo, las CBS no reaccionan igual según el tipo de plantas, por ello es importante combinar adecuadamente esta técnica con un procedimiento correcto de reforestación (Rivera, et al, 2004). Respecto a esto último, la fertilidad del suelo mejora notablemente con la implementación de CBS debido a que ciertas bacterias participan en el ciclo del nitrógeno contribuyendo al reservorio de nutrientes del suelo. La cantidad de nitrógeno fijado por las CBS puede fluctuar alrededor de los 100 Kg/ha/año y en el caso del carbono, el parte puede ser entre 6 a 350 Kg/ha/año. Esto representa un enorme potencial de abastecimiento de sustancias orgánicas, sobretodo en suelos erosionados (Rivera, et al, 2004).

Las CBS representan un enorme potencial para la recuperación de suelos, aunque, aún falta por descubrir, ya que, aún existe falta de información respecto a su influencia en los ciclos biogeoquímicos del fósforo; de la misma forma, aún falta mucho por descubrir respecto a su interacción con las plantas vasculares. Debido a que la mayor parte de los estudios se han efectuado en estados Unidos, Israel y China, aún faltan estudios sobre en Latinoamérica; por ello representa una futura fuente de estudios en los suelos áridos y semiáridos de Chile (Castillo, et al, 2011). Debido a que la CBS incrementa la infiltración, el contenido de humedad en los suelos y disminuye la escorrentía, se convierten en un poderoso aliado para combatir la erosión y promover los parches de fertilidad en zonas atacados por cárcavas (Toledo, et al, 2012). De esta forma, mitigan la degradación de los suelos y tienen un efecto biofertilizante natural (Toledo, et al, 2009).

Sin embargo, las CBS están limitadas por elementos exógenos como por ejemplo, acción humana, pisoteo de ganado etc. lo cual puede disminuir sus mecanismos de acción, ya que, en condiciones naturales y sometidas en extremo a estas variables, la CBS no incide en un aumento de la infiltración (Quiñonez, et al, 2009). Esto implica que aún faltan más estudios, lo que representa un enorme potencial a futuro.



---

## CAPITULO IX

### BIBLIOGRAFIA GENERAL

---



ACOSTA, María y Zuluaga, Francisco. *Tutorial sobre redes neuronales aplicadas en ingeniería eléctrica y su implementación en un sitio web*. Tesis (Ingeniero eléctrico). México, Universidad Tecnológica de Pereira, 2000. 250 págs.

ADAME, Salvador. Efecto del manejo integral de la cuenca del río Texcoco, sobre la producción de agua y sedimentos, en: boletín Investigaciones geográficas, N° 39: 53 – 67, 1999.

AGUILAR, alma. Las redes neuronales artificiales como una herramienta alternativa o complementaria a los métodos de clasificación tradicionales. Tesis (actuarial). México, D.F. México. Universidad nacional autónoma de México, Facultad de estudios superiores Acatlán, 2008. 110 págs.

ÁLVAREZ, Juan; Balboa, Miguel; Merino, Agustín y Rodríguez, Roque. Estimación de la biomasa arbórea de *Eucalyptus globulus* y *Pinus pinaster* en Galicia. Recursos Rurais. 1 (1) : 21-30. 2005

ARAYA, Juan. *Suelos urbanos contaminados por hidrocarburos*. Tesis (Master oficial europeo en Gestión ambiental y ordenamiento territorial). Santiago, Chile. Universidad de Barcelona – Universidad tecnológica metropolitana, 2009. 242 págs.

ARIAS, Michael. La ingeniería de requerimientos y su importancia en el desarrollo de proyectos de software, en InterSedes 6(10): 1 – 13, 2006

AUDESIRK, Teresa; Audesirk, Gerald. *Biología. La vida en la tierra*, 9<sup>na</sup> edición México, Editorial Prentice Hall Hispanoamericana, 2008, 924 págs.

BAÑUELOS, G; Ajwa, H, Cáceres, L y Dyer, D. Differences in accumulation and tolerance to high boron concentrations of agricultural species between the North of Chile and California in The United States of América. *Idesia* N°17: 31 – 39. 1999

BARRA, Fernando; Rabbia, Osvaldo; Alfaro, Guillermo; Miller, Hubert; Höfer, Christine y Kraus, Stefan. *Serpentinitas y cromititas de La Cabaña, Cordillera de la Costa, Chile central*. Revista Geológica de Chile. 25(1): 23 – 34. 1998

BASHAN, Yoav; Puente, Esther; Salazar, Bernardo; Bashan, Luz; Bacilo, Macario; Hernández, Juan-Pablo, Leyva, Luis; Romero, Blanca; Villalpando, Rocio y Bethlenfalvay, Gabor. Reforestation of eroded land in the desert. Role of plant growth promoting bacteria and organic matter, en: Suelos ecuatoriales 35 (1):70-77, 2000

BECERRA, Antonio. Conservación de suelos y desarrollo sustentable, ¿utopía o posibilidad?, en: revista *Terra Latinoamericana*, 16 (02): 2 – 8, 1998.

BERTALANFFY, Ludwig. *Teoría general de los sistemas*. 7<sup>a</sup> edición. México, D.F. Editado por Fondo de cultura económica, 1989, 336 págs.

BONDARENKO, Natalia. El lenguaje y la teoría del caos, en: revista *Opción*, N° 53: 38 – 51, 2007.

BRAILOVSKY, Antonio; *Esta, nuestra única tierra*. 1ª edición, Buenos Aires Argentina, Editorial Maipue, 2004, 127 págs.

BUSTOS, Edmundo; Marquet, Pablo y Palacios, Adrián. *Las rutas de la complejidad*. 1ª edición. Valparaíso, Chile. Editado por el Instituto de estudios complejos, 2014. 230 págs.

BUZUNARIZ, Miguel; Muñoz, Adolfo; Cristi, Claudio; Pérez, Rodolfo; Muñoz, Juan; Plaza, Oscar, Riveros, Ricardo y Santelices, Marcela. *Árboles nativos de Chile*. 1ª edición, Santiago de Chile. Editado por Enersis y Fundación Huinay, 2010, 196 págs.

CARIELLO, María; Castañeda, Liliana; Riobo, Inés y González, Jimena. *Inoculante de microorganismos endógenos para acelerar el proceso compostaje de residuos sólidos urbanos*. R. C. Suelo Nutr. Veg. 7 (3): 26 – 37. 2007.

CASTILLO, Andrea y Maestre, Fernando. *La costra biológica del suelo: Avances recientes en el conocimiento de su estructura y función ecológica*. Revista Chilena de Historia Natural 84: 1 – 21, 2011.

CIENFUEGOS, Astrid; Gómez, Giovan; Cordova, Liliana; Luckhart, Shirley; Conn, Jan y Correa, Margarita. *Diseño y evaluación de metodologías basadas en PCR-RFLP de ITS2 para la identificación molecular de mosquitos Anopheles spp. (Diptera: Culicidae) de la Costa Pacífica de Colombia*. Rev Biomed, 19: 35 – 44, 2008.

CIREN. Centro de información de recursos naturales. Estudio Agrologico RM. Descripción de suelos, materiales y símbolos. Tomo 1. Santiago. 1996.

CORTES, Amparo. *Los suelos contaminados y su gestión*. Barcelona, España. Editado por el Departamento de productos naturales, Biología vegetal y edafología. Universidad de Barcelona. 2007. 184 págs

CHINERY, Michael. *Guía de campo de las plantas silvestres*. 1ª edición Barcelona, España. Editorial Blume, 1988, 285 págs.

DAFT, Richard and Marcic, Dorothy. *Introducción a la administración*. 4ª edición, México, D.F. 2006, 950 págs.

DAVYT, Nicolas. *Ingeniería de requerimientos. Guía para extraer, analizar, especificar y validar los requerimientos de un proyecto*. Documento técnico, Universidad de Uruguay. Montevideo, Uruguay. 2001, 51 págs.

DE SIMON, Estanislao y De Simón, José Antonio. Restauración de la cubierta vegetal en zonas semiáridas. En: Curso internacional de restauración hidrológica forestal, control de la erosión y defensa contra la desertización (5º, 1998, Madrid, España). Documentación. Madrid, España. Ministerio del Medio Ambiente, Dirección general de conservación de la naturaleza, 1998, pp. 1 – 27.

DI PACE, Maria; Bartrons, Horacio. *Ecología de la ciudad*. 1ª edición, Buenos Aires, Argentina. Editorial Prometeo, 2004, 382 págs.

DOMINGUEZ, Javier. *Breve introducción a la cartografía y a los sistemas de información geográfica (SIG)*. Informe técnico N° 943, editado por el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas). Ministerio de Ciencia y Tecnología: Madrid, España. 33 págs., 2000.

DOMÍNGUEZ, Sergio, Campoy, Pascual; Sebastián, José y Jiménez, Agustín. "*Control en el Espacio de Estado*", Editorial Pearson Educación SA, 2ª edición, 437 págs. 2006,

DONOSO, Claudio. *Árboles nativos de Chile. Guía de reconocimiento*. 4ª edición. Valdivia, Chile. Marisa Cuneo Ediciones, 1989, 60 págs.

DOUROJEANNI, Axel. "El contexto de gestión integrada de recursos hídricos por cuencas". En: Curso Internacional Conaf – Jica "Gestión integrada de cuencas hidrográficas con énfasis en desarrollo sustentable de territorios rurales y medioambiente" (10º, 2011, Santiago de Chile). Santiago de Chile, Fundación Chile, 2010, 64 págs.

DUARTE, R. Simposio Nacional sobre Degradación de Suelos (1º, 1990, México, D.F.) Contribución del representante y jefe de la misión diplomática de la FAO en México. México. Universidad Nacional Autónoma de México. 1990. 97-103

ELBERT, W; Weber, B; Burrows, S; Steinkamp, J; Büdel, B; Andreae, M y Poschl, U. *Contribution of cryptogamic covers to the global cycles of carbon and nitrogen*. Nature Geoscience. 5: 459 – 462. 2012

ESCALANTE, Adelfo; Gosset, Guillermo; Martínez, Alfredo y Bolívar, Francisco. *Diversidad bacteriana del suelo: métodos de estudio no dependientes del cultivo microbiano e implicaciones biotecnológicas*. Agrociencia, 38(6): 583 – 592. 2004

ESPAÑOL, E; Zas, R y Vega, G. Contenidos foliares en macro y micronutrientes en nueve especies de *eucalyptus* en el noroeste español. *Invest. Agr. Sist. Recur. For.* Vol. 9 (2): 209 – 217. 2000.

ESPINOZA, Laura. Guía práctica sobre la técnica de PCR. En: EGUIARTE, Luis; Souza, Valeria y Aguirre, Xitlali, *Ecología Molecular*. México, D.F. Editado por: Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. 2007, 608 págs.

ESPINOZA, Ulises y Sánchez, Francisco. Restauración de áreas degradadas mediante la reforestación. *La Jornada*, Michoacán, México. 16 de agosto de 2006. Pág. 3, col 1.

FERNÁNDEZ, Víctor. Proposición de un plan de manejo integral de la cuenca hidrográfica del Estero Yali, Región Metropolitana. Tesis (Ingeniero forestal). Santiago, Chile. Universidad Mayor, Facultad de ciencias forestales, 2004. 192 págs.

FANCELLI, AL. Micronutrientes en la fisiología de las plantas. En: M Vázquez (ed). Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. Buenos Aires, Argentina. 207pp. 2006

FERRARIS, G; Couretot, L y Urrutia, J. Tecnologías para la aplicación de microelementos en maíz. Dosis y sistemas de aplicación de zinc en combinación con fuentes nitrógeno-azufradas. V Jornada de Maíz. AIANBA-INTA EEA. 11p. 2010.

FIERER, Noah; Breitbart, Mya; Nulton, James; Salamon, Peter; Lozupone, Catherine; Jones, Ryan; Robeson, Michael; Edwards, Robert; Felts, Ben; Rayhawk, Steve; Knight, Rob; Rohwer, Forest and Jackson Robert. Metagenomic and Small-Subunit rRNA Analyses Reveal the Genetic Diversity of Bacteria, Archaea, Fungi, and Viruses in Soil. *Applied and environmental microbiology*, (73) 21: 7059–7066. 2007.

FRANCKE, Samuel. Manejo del Suelo Posible para el Desarrollo Forestal del Semiárido Chileno. Documento Técnico N° 127, *Chile Forestal*, Santiago, Chile, 1999. 40 pags.

FRANCKE, Samuel; Vargas, Rodrigo; Torugawa, Koichi y Marita, Masatoshi. *Manual de control de erosión*, editado por CONAF. Santiago de Chile. 2004, 73 págs.

FRANCKE, Samuel; Yoma, Ricardo; Carnieletto, Celso; Rivera, Hugo y Nakagawa, Mamoru. Informe técnico de la contribución de conaf a la estrategia nacional de cuencas, editado por CONAF. Santiago de Chile. 2008, 72 pags.

FREEMAN, James & Skapura, David. Neural networks: Algorithms, applications and programming techniques. 1ª edición. Pearson education, 1993. 550 pags.

GARCÍA, Javier. Valorización de servicios ambientales para generar un sistema de pago por compensaciones aplicado en la cuenca del río clarillo. Tesis (Ingeniero ambiental). Santiago, Chile. Universidad de Santiago de Chile, Facultad de ingeniería, departamento de ingeniería geográfica, 2013. 137 págs.

GOLDBERG, S; Forster, H and Heick, E. Boron adsorption mechanisms on oxides, clay minerals, and soils inferred from ionic strength effects. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57:704-708. 1993

GOMEZ, Domingo. *Recuperación de espacios degradados*". Ediciones Mundi – Prensa, Madrid, España. 1ª edición, 2004. 584 págs.

GOMEZ, Emilio. Descripción física de una cuenca. EIA, Anexo II, Restauración hidrológico forestal de la cuenca de la cuenca del embalse de Cuevas de Almazora. ETS de ingenieros de caminos canales y puertos. 1 – 7. 2002.

GONZALEZ, María. La ciudad sostenible: Planificación y teoría de sistemas, en: *Boletín de la A.G.E.* N° 33: 93 – 102, 2002.

GONZÁLEZ, Ricardo; Ríos, Darcy; Avilés, Fabiola y Sánchez-Olate, Manuel. Multiplicación *in vitro* de *Eucalyptus globulus* mediante sistema de inmersión temporal. *Bosque* 32(2): 147-154. 2011.

GRIMM, Mirco; Jones, Robert and Montanarella, Luca. *Soil erosion risk in Europe*. Napoli, Italia. European commission, Directorate general jrc, Joint research centre, Institute for environment and sustainability, 2002, 44 pags.

GUPTA, S. *"Transform and State Variable Methods in Linear Systems"*, John Wiley & Sons Inc, 1966.

HAWKES, Christine. .V. 2003. Microorganismos del suelo, plantas en peligro de extinción y la conservación del Matorral de Florida. *Ecosistemas*, 12(2): 2 – 23. 2003.

- HAYKIN, S. "Kalman Filtering and Neural Networks ", John Wiley & Sons Inc, 2001,
- HENRY, Glynn y Heinke, Gary. *Ingeniería ambiental*. 2ª edición, México, Editorial Prentice Hall Hispanoamericana, 1999, 778 págs.
- HUBER, Anton; Irouméb, Andres; Mohrc, Cristian y Frêne, Cristian. Efecto de plantaciones de *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus* sobre el recurso agua en la Cordillera de la Costa de la región del Biobío, Chile. *Bosque*, 31(3): 219-230, 2010
- IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. *Directrices del IPCC para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero*. Cambridge University Press, Cambridge. 1996
- ITURBE-ARGÜELLES, R; Flores, R; Torres-Bustillos, L. *Análisis de riesgo a la salud de una instalación petrolera del Suroeste de México*. Ingeniería Investigación y Tecnología VII. 1. 1-15. 2005
- JULCA, Alberto; Meneses, Liliana; Blas, Raúl y Bello, Segundo. *La materia orgánica: importancia y experiencias de su uso en la agricultura*. Idesia, 24(1): 49 – 61. 2006.
- KAEBERLEIN, T; Lewis, K and Epstein, S. Isolating Uncultivable Microorganisms in Pure Culture in a Simulated Natural Environment. *Science*, Vol 296: 1127 – 1129. 2002
- LAVENU, Alain y Cembrano, Jose. *Deformación compresiva cuaternaria en la Cordillera Principal de Chile central, Cajón del Maipo, este de Santiago*. Revista Geológica de Chile 35 (2): 233-252. 2008
- MADIGAN, Michael; Martinko, John y Dunlap, Paul. *Biología de los Microorganismos*. 12ª edición, Madrid, España. Editado por Pearson Prentice Hall, 2009, 1296 págs.
- MALAVOLTA E, Vitti G, de Oliveira S.. *Avaliação do estado nutricional das plantas: Princípios e aplicações*. 2ª. Ed. POTAFOS. Piracicaba, Sao Paulo, Brasil. 1997
- MALVARDI, Adriana. Clave para larvas de las subfamilias sudamericanas de gorgojos (*Coleoptera, Curculionidae*). Revista Chilena de Historia Natural. 76: 603-612, 2003
- MARTIN, Martin, "Process Control: Designing Processes and Control Systems for Dynamic Performance", Editorial McGraw Hill, 2000.
- MARTINEZ DE AZAGRA, Andrés y Navarro, Joaquin. *Hidrología forestal*. 3ª edición, Valladolid, España. Editado por la Universidad de Valladolid, 1996, 286 págs.
- MARTINEZ, María José y Fajardo, Rodolfo. Ecosystem value in the Western Patagonia protected areas. *Journal for Nature Conservation*. N° 16: 72—87, 2008.
- MCCAIG, A. E., S.J. Grayston, J.I. prosser, and L.A. Glover.. Impact of cultivation on characterization of species composition of soil bacterial communities. *FEMS Microbiol. Ecol.* 35:37-48. 2001

MENA, Carlos & Montecinos, Rodrigo. Comparación de redes neuronales y regresión lineal para estimar productividad de sitio en plantaciones forestales, utilizando geomática *Bosque* 27(1): 35-43, 2006

MÉNDEZ, Williams and Marcucci Ettore. Morphometric analysis of the Curucutí Creek catchment, Vargas State-Venezuela. *Revista Geográfica Venezolana*, Vol. 47(1): 29-55. 2006.

MOLANO, Andrés. Aislamiento de bacterias biofertilizantes (*Nitrobacter*, spp, *Rhizobium*, spp, *Azospirillum*, spp) para un sistema de compost tipo windrow. *Umbral científico*. N° 5: 25 – 32. 2004.

MORAS, Guillermo y Vallejos-Barra, Oscar. Tablas de volumen para árboles individuales de *Eucalyptus globulus ssp.globulus* cultivados en la región sur de Uruguay. *Agrociencia*, 17(2):11-24. 2013

MORENO, Laura y Galvis, F. Potencial biofertilizante de bacterias diazótroficas aisladas de muestras de suelo rizosférico. *Pastos y Forrajes*, 36(1): 33 – 37. 2013.

MOURGUES, Víctor. Zanjas de infiltración: donde no llegan las maquinas. *Chile Forestal* N° 259. 1998. 61 págs.

NANIA, Leonardo. La cuenca y los procesos hidrológicos. Apuntes. Editado por: Universidad de Granada y la ETS de ingenieros de caminos, canales y puertos. 1 – 8. 2003.

NUÑEZ, Guillermo; Barahona, Cristian y Arriagada, Servando. Mampostería gavionada en la protección hidrológico forestal, Documento técnico, editado por el programa de manejo de cuencas de CONAF. Santiago de Chile. 1982, 34 págs.

OLIVA, Marco; Barros, Nairam y Mouza Gomes, María. Muerte apical en eucalipto y manejo nutritivo de plantaciones forestales: aspectos fisiológicos del problema, en: *Bosque* 16 (1): 77-86, 1995

OVANDO, Gustavo; Bocco, Monica & Sayago, Silvina. Redes neuronales para modelar predicción de heladas. *Agricultura técnica* 65(1): 65 – 73. 2005

QUINTERO, María. Características fundamentales de las políticas ambientales: el riesgo y la incertidumbre, en: revista *Aportes* N° 29: 107 – 120, 2005.

QUIÑONES, Jesús; Castellanos, Edmundo; Valencia, Celso; Martínez, Juan; Sánchez, Teodoro y Montes, Carlos. *Efecto de la costra biológica sobre la infiltración de agua en un pastizal*. *Terra Latinoamericana*, 27(4) 287 – 293, 2009.

RAMÍREZ, Joaquín; Castañeda, Darío y Morales, Juan. *Dinámica microbiana del suelo asociada a diferentes estrategias de manejo de Phytophthora cinnamomi Rands en aguacate*. *Ceres*, Viçosa, 60 (6): 811–819, 2013.

RICHTER, Ivors; Shi, K y Benson, D. *Cellulase activity as a mechanism for suppression of Phytophthora root rot in mulches*. *Phytopathology*, 101: 223 – 230. 2011



RIVERA, Víctor; Manuel, Irma y Godínez, Héctor. *Las costras biológicas del suelo y las zonas áridas*. Ciencias, 75: 24 – 27, 2004.

RODRÍGUEZ, José. Control de la erosión y defensa contra la desertificación. Diseño de obras transversales. Área de Servicios Forestales Tragsatec. Madrid, España. 2004, 55 págs.

ROJAS, Alejandro. ¿Desarrollo sustentable o desarrollo de la sustentabilidad ecológica y social?. En: *Medio ambiente en desarrollo*. Santiago de Chile. Ricardo Katz y Gabriel del Fávero, editores. Centro de estudios públicos. 1993. 1 – 40.

RUBIO, Patricio. La teoría general de sistemas y el paisaje, en: revista *Treballs de la societat catalana de geografia*. Nº 41: 91 – 104, 1996.

RÜGNITZ, Marcos; Chacón, Mario y Porro, Roberto. *Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales*. 1ª edición. Lima, Perú. Editado por: Centro Mundial Agroforestal (ICRAF) / Consorcio Iniciativa Amazónica (IA). 2009, 79 págs.

SALAZAR, Enrique; Beltrán, Alfredo; Fortis, Manuel; Leos, Juan; Cueto, José; Vázquez y Cirilo; Peña, Juan. Mineralización de nitrógeno en el suelo y producción de maíz forrajero con tres sistemas de labranza. *Terra Latinoamericana*, 21(4): 569-575. 2003

SALINI, Giovanni & Pérez Patricio. Estudio de series temporales de contaminación ambiental mediante técnicas de redes neuronales artificiales. Revista chilena de ingeniería, 14 (3): 284 – 290. 2006

SANDOVAL, Hugo; Prendez, Margarita y Ulriksen, Pablo. *Contaminación atmosférica en Santiago: Estado actual y soluciones*. 1ª edición, editado por Universidad de Chile – Comisión de descontaminación metropolitana. Santiago de Chile, 1993, 430 págs.

SANTIAGO, Iván. *Fundamentos de Arcgis*. Editado por: Oficina de gerencia y presupuesto de Puerto Rico, Área de tecnología de información gubernamental. San Juan, Puerto Rico, 1ª edición, 2005, 157 págs.

SCHEID, López. *Micronutrientes: La experiencia brasilera. Filosofía de aplicación y eficiencia agronómica*. En: M Vázquez(ed). Micronutrientes en la agricultura. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. Buenos Aires, Argentina. 207 págs. 2006

SCHLATTER, Juan; Grez, Renato y Gerding, Victor. *Manual para el reconocimiento de suelos*. 3ª edición, Valdivia Chile. Editado por Instituto de silvicultura, Facultad de ciencias forestales, Universidad Austral de Chile, 2003, 113 págs.

SEMINARIO en formación docente en sustentabilidad y docencia (2º, 2015, Santiago de Chile). *Sustentabilidad y Minería: Estrechando la brecha*, Facultad de ciencias físicas y matemáticas, 2014. 19 págs.

SOLOMON, Eldra; Berg, Linda; Martin, Diana y Villee, Claude. *Biología*. 4ª edición, México, D.F. Editorial Mc Graw Hill, 1998, 1306 págs.

SOMMERVILLE Ian. *Ingeniería del Software*. 7ª edición, México DF, Editorial Pearson. 2005, 250 págs.

SOTO, Guido y Ulloa, Francisco. *Diagnóstico de la desertificación en Chile*. 1ª edición, Santiago de Chile. Editado por: Ministerio de agricultura de Chile, 1997, 398 págs.

SUAREZ, Juana y Bravo, José. Cálculo de parámetros morfométricos y propuesta de ordenación agroforestal en la subcuenca el Cacao provincia ciudad de la Habana. Boletín Instituto de investigaciones forestales de la Habana. 2005, 1 – 7.

SYLKE, H. Análisis de calicatas en el sector de Alto Loica, San Pedro de Melipilla. Tesis (Geógrafo). Santiago, Chile. Universidad de Stuttgart-Hohenheim, Facultad de Geografía, 2005. 110 págs.

TAPIA, Roberto; Flores, Juan; Sangüesa Claudia, Martínez, Enzo y León, Lastenia. Diseño hidrológico de zanjas de infiltración en el secano costero e interior de las regiones semiáridas de Chile, en *Bosque* 29(2): 136 – 145, 2008

TÉLLEZ, Alex. *Gestión sostenible de paisajes naturales*. 1ª edición. Madrid, España. 2001, 304 págs.

TOLEDO, Valentina y Florentino, Adriana. *Las Costras Microbióticas del Suelo*. Revista de Investigación 68(33): 199 – 216. 2009.

TOLEDO, Valentina y Florentino, Adriana. *Evaluación de las propiedades biológicas y bioquímicas de la costra microbiótica de un suelo bajo vegetación natural en la región árida de Quíbor, Venezuela*. Revista de Investigación 75(36): 143 – 163. 2012.

TRIVELLI, Cristián. Evaluación de la aplicación de técnicas de restauración hidrológica forestal y ambiental en procesos de erosión de cárcavas. Tesis (Ingeniero forestal). Santiago, Chile. Universidad Mayor, Facultad de ciencias forestales, 2006. 156 págs.

ULRICI, Williams. *Contaminated soil areas, different countries and contaminants monitoring of contaminants*. En H. J. Rehm y G. Reed (Eds.). Environmental Processes II. Soil Decontamination, Biotechnology, Vol 11b. pp. 5-42. 2000

VARGAS, Rodrigo. “Elementos de diseño de estructuras de conservación de suelos y aguas”. En: Curso Internacional CONAF – JICA “Gestión integrada de cuencas hidrográficas” (7º, 2010, Santiago de Chile). Santiago de Chile, Programa de restauración de cuencas hidrográficas en la zona semiárida de Chile. 2010.

VIAL, Gonzalo. *Historia de Chile: La sociedad chilena en el cambio de siglo*. 2ª edición. Vol. I, Tomo II. Santiago de Chile, Editorial Santillana, 1981, 577 págs.

VIAL, Gonzalo, *Historia de Chile: La sociedad chilena en el cambio de siglo*. Editado por Santillana del pacifico S.A. 2ª edición, Volumen I Tomo I. Santiago de Chile, 1981, 424 págs.

WELCH, Greg and Bishop, Gary. “*An Introduction to the Kalman Filter*”, Department of Computer Science, University of North Carolina at Chapel Hill, 2002

YAMADA, Tsuioshi. Deficiencias de micronutrientes, ocurrencia, detección y corrección: “el éxito de la experiencia brasilera”. *Informaciones Agronómicas* N° 9: 1 – 23. 2004.

ZAMUNER, E & Culot, J. Efecto de la fertilización en la capacidad de sorción de fosforo. Invest. Agr. prod. prot. veg. 14 (2): 107 – 116. 1999

## Web

ALVARADO, Miguel. *Erosión del suelo en el estado de Tlaxcalan* [en línea]. México. D.F. Centro interdisciplinario de investigaciones y estudios sobre medio ambiente y desarrollo. 2000. [Fecha de consulta: 5 de febrero de 2010]. Disponible en: <<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/ciemed/erosion.pdf>>

BIBLIOTECA DIGITAL NODOMATERIAS. Universidad Nacional de San Luis, Argentina. 3 de marzo de 2013. <<http://www.bd.unsl.edu.ar/download.php?id=281>>

CAMPUS VIRTUAL VIRTUALAULAS. Universidad del País Vasco. 28 de febrero de 2013. <[http://cvb.ehu.es/open\\_course\\_ware/castellano/salud/tecnicasmol/protocolo-1-obtencion-de-adn-de-bacterias-patogenas.pdf](http://cvb.ehu.es/open_course_ware/castellano/salud/tecnicasmol/protocolo-1-obtencion-de-adn-de-bacterias-patogenas.pdf)>

DEPARTAMENTO DE BIOLOGIA (1). Facultad de ciencias, Universidad de Puerto Rico. 4 de marzo de 2013. <[http://biology.uprm.edu/files/modulo\\_i\\_extraccion\\_de\\_adn.pdf](http://biology.uprm.edu/files/modulo_i_extraccion_de_adn.pdf)>

DEPARTAMENTO DE BIOLOGIA (2). Facultad de ciencias, Universidad de Puerto Rico. 4 de marzo de 2013. <[http://biology.uprm.edu/files/modulo2\\_b3770l.pdf](http://biology.uprm.edu/files/modulo2_b3770l.pdf)>

ESCOBAR, Mariana. *La bacteria que revive los suelos erosionados por la coca*. 23 de agosto de 2015 <<http://www.eltiempo.com/colombia/medellin/bacillus-subtilis-bacteria-que-ayuda-a-los-suelos-erosionados-por-la-coca/16061517>>

ESCUELA DE GEOCIENCIAS. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. 3 de marzo de 2013. <[http://www.unalmed.edu.co/~esgeocien/documentos/rramirez/identificacion\\_y\\_cuantificacion\\_de\\_la\\_actividad\\_microbiana\\_y\\_macro\\_fauna\\_de\\_un\\_andisol\\_bajo\\_diferentes\\_sistemas\\_de\\_manejo\\_en\\_el\\_municipio\\_de\\_marinilla\\_antioquia.pdf](http://www.unalmed.edu.co/~esgeocien/documentos/rramirez/identificacion_y_cuantificacion_de_la_actividad_microbiana_y_macro_fauna_de_un_andisol_bajo_diferentes_sistemas_de_manejo_en_el_municipio_de_marinilla_antioquia.pdf)>

INSTITUTO DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA. Instituto nacional de pesquisas espaciales. 2 de Mayo de 2011. <http://www.lnpe.br>

MEMORIA CHILENA. Biblioteca nacional de Chile. 23 de agosto de 2015, <<http://www.memoriachilena.cl/602/w3-article-3388.html> >

NEWSLETTER MICROBIAL. [en línea]. Girona, España. Universidad de Girona, 2009. [fecha de consulta: 4 de marzo de 2013]. Publicacion bimensual. Disponible en: <[http://www.microbial-systems.com/web/docs/Newsletter\\_Microbial\\_03.pdf](http://www.microbial-systems.com/web/docs/Newsletter_Microbial_03.pdf)>

PROGRAMA OFICIAL DE POSGRADO EN MICROBIOLOGIA. Universidad Autónoma de Madrid. 1 de marzo de 2013. <<http://www.uam.es/docencia/microbio/archivos/fichas/guion-ecologiamicro.pdf>>

RODRIGUEZ, Francisco. Prácticas de microbiología. [en línea]. Comunidad Valenciana, España. Facultad de Farmacia, Universidad Miguel Hernández de Elche. 2005.[Fecha de consulta: 3 de marzo de 2013] <<http://egg.umh.es/frvalera/manualDePracticas.pdf>>

RODRÍGUEZ; José Luis y Sánchez, Jesús. *Biorremediación: Aspectos tecnológicos y aplicación al vertido del Prestige*. [en línea]. Madrid, España. Consejo superior de colegios de ingenieros de minas. [Fecha de consulta: 26 de agosto de 2001]. Disponible en: <[http://ingenierosdeminas.org/docu/documentos/aspectos\\_tecnologicos\\_%20biorremediacion.pdf](http://ingenierosdeminas.org/docu/documentos/aspectos_tecnologicos_%20biorremediacion.pdf)>

SALAZAR, Faunier. *El Boro*. [en línea]. Palmira, Colombia, 2006. [Fecha de consulta: 13 de Noviembre de 2012]. Disponible en: <[http://www.agrosagi.com/a\\_mes/EL%20BORO%20consideraciones%20Basicas.PDF](http://www.agrosagi.com/a_mes/EL%20BORO%20consideraciones%20Basicas.PDF)>

SANZ, David. Desarrollo sostenible. *Bacterias para regenerar suelos arrasados por incendios*. 26 de agosto de 2015. <<http://www.ecologiaverde.com/bacterias-para-regenerar-suelos-arrasados-por-incendios/>>

SOFOFA. Sociedad de fomento fabril. 23 de agosto de 2015. <<http://web.sofofa.cl/informacion-economica/indicadores-economicos/estructura-de-la-industria/>>

SMA. SECRETARIA DEL MEDIO AMBIENTE DEL GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL. *Agenda ambiental de ciudad de México*. [en línea]. México, D.F. Programa de Medio Ambiente 2007-2012. 2007. [Fecha de consulta: 5 de febrero de 2010]. Disponible en: <<http://www.sma.df.gob.mx/sma/links/download/archivos/agendambiental2008>>

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. 30 de julio de 2014. <http://www.usgs.gov/>  
VASEK, Olga; Hebert, E; Giori, G; Raya, R y Fusco, A. Secuencia parcial del gen 16S rRNA de cepas constituyentes de un fermento para la elaboración de Queso Artesanal de Corrientes. [en línea]. Corrientes, Argentina. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura. Universidad Nacional de Nordeste. [Fecha de consulta: 1 de marzo de 2013]. Disponible en: <<http://www.unne.edu.ar/unnevieja/Web/cyt/cyt/2001/8-Exactas/E-051.pdf>>

WOLFENSBERGER Lilly. *Restauración de suelos*. [en línea]. México. D.F. 2006. . [Fecha de consulta: 5 de febrero de 2010]. Disponible en: <<http://www.lillywolfensberger.com/bio-construccion/biocons5.html>>

---

# ANEXOS

---



## ANEXO 1

### SERIES DE SUELOS PREDOMINANTES EN SAN PEDRO DE MELIPILLA<sup>120</sup>

Las series de suelos presentes en el sector de Alto Loica son Cauquenes (CQ), Estancilla (STL), LingoLingo (LGG) y Lo Vásquez (LVZ). La base de datos de Ciren (1996) da las siguientes descripciones para estas series e suelos.

#### 1. ASOCIACIÓN CAUQUENES (CQ)

##### Caracterización General

El pedón representativo de uno de los componentes de la Asociación Cauquenes se clasifica en tentativamente en el Orden Alfisol. Son suelos profundos, formados "in situ" a partir de rocas graníticas, bien evolucionados, de texturas arcillosas en todo el perfil y color pardo rojizo amarillento en el matiz 5 YR en la superficie y color rojo amarillento en profundidad en el mismo matiz anterior. Descansa sobre un substrato constituido por roca granítica muy meteorizada y rica en cuarzo y feldespatos. Ocupa una posición topográfica de cerros y lomajes. Estos suelos han sido históricamente muy cultivados por cereales lo que ha ocasionado diversos y avanzados grados de erosión. Su vegetación natural es principalmente a base de espinos (Acacia caven) y litre (Lithrea caustica). Presentan estructura de bloques en los dos primeros horizontes y maciza en el último; cutanes a partir del segundo horizonte. Cristales y gravilla granítica tanto en la superficie como en el perfil que aumentan en profundidad.

##### Características Físicas y Morfológicas del Pedón. Profundidad (cm.)

**0–20 (A1):** Pardo rojizo oscuro (5 YR 3/3) en húmedo; arcillosa; muy plástico y muy adhesivo; firme en húmedo y duro en seco; estructura de bloques angulares medios, moderados. Raíces finas y medias comunes; poros finos comunes; actividad biológica escasa. Gravilla angular cuarcífera, abundante. Cutanes discontinuos, moderadamente espesos, comunes. Límite ondulado, claro.

**20–55 (Bt2):** Rojo amarillento (5 YR 4/6) en húmedo; arcillosa (arcilla densa); muy plástico y muy adhesivo; firme en húmedo y duro en seco; estructura de bloques angulares medios y gruesos, moderados que se parten en finos. Raíces finas y medias comunes; poros finos y medios abundantes; actividad biológica común. Crotovinas comunes. Cutanes finos, discontinuos, comunes. Gravilla granítica abundante. Cristales de cuarzo abundantes. "Lenguas" de arcilla del horizonte superior. Manchas ferromangánicas escasas. Límite ondulado, difuso.

**55–100 (Bt3):** Color vario, dominante pardo rojizo (5 YR 4/3) y rojo amarillento (5YR 4/6) en húmedo; arcillosa; muy plástico y muy adhesivo; firme en húmedo y muy duro en seco; estructura maciza que se parte en bloques angulares medios, moderados. Raíces finas y medias escasas; poros finos comunes. Cristales de cuarzo abundantes y mica común. Gravilla granítica muy abundante. Cutanes discontinuos, delgados, comunes. Manchas ferromangánicas escasas. **100–120 (C) :** Substrato constituido por roca granítica meteorizada.

---

<sup>120</sup> CIREN. Centro de información de recursos naturales. Estudio Agrologico RM. Descripción de suelos, materiales y símbolos. Tomo 1. Santiago. 1996.

## Rango de Variaciones

La profundidad efectiva del suelo fluctúa entre profundo y moderadamente profunda, ocasionalmente delgada y que está asociado al grado de erosión que presentan estos suelos. Ocupan una posición de lomajes y cerros de la formación granítica de la Cordillera de la Costa. Son suelos de buen drenaje y sólo en los sectores suavemente ondulados y/o deprimidos presentan abundantes concreciones ferromangánicas. Tanto la Serie como las Fases presentan de ligero a abundante contenido de gravilla cuarcífera en la superficie, de acuerdo al grado de erosión. Ocasionalmente presentan gravas y/o bolones graníticos escasos en la superficie y/o perfil. Son suelos que presentan de ligera a muy severa erosión que va desde erosión de manto a abundantes cárcavas. Es el suelo que por su génesis y grado de explotación agrícola presenta mayor erosión de los suelos de Chile. Sin embargo, el pino radiata crece bien dentro de las cárcavas de erosión. El horizonte superficial es de color pardo rojizo oscuro en el matiz 5 YR y la textura es arcillosa que puede variar hasta franco arcillosa. En los horizontes inferiores la textura varía desde arcillosa a arcilla densa y el color siempre en el matiz 5 YR y solo en perfiles erosionados el matiz llega a 7.5 YR. El substrato granítico presenta diversos grados de meteorización que permite el desarrollo radicular. Todo el perfil presenta de moderado a abundante contenido de cristales de cuarzo, mica y feldespatos ortosa.

## Posición

Ocupan una posición de cerros y lomajes dentro de la Cordillera de la Costa.

## 2. SERIE ESTANCILLA (STL)

### Caracterización General

La Serie Estancilla es un miembro de la Familia franca gruesa sobre arenosa esquelética, mixta, térmica de los Typic Xerochrepts (Inceptisol). Son suelos de origen aluvial, estratificados, ligeramente profundos, que se presentan ocupando la posición de abanicos aluviales y terrazas aluviales en sectores de la Cordillera de la Costa, principalmente en valles interiores y cuencas cerradas y en algunos sectores restringidos del Llano Central, de colores pardo amarillento oscuro en tono 10 YR, textura franco arenosa que en profundidad se transforma en arena francosa y finalmente en arena, débilmente estructurado en los primeros 50 cm., donde predominan los bloques subangulares débiles, reduciéndose el tamaño de gruesos a finos de acuerdo a la profundidad. Los materiales originales son principalmente graníticos y el arraigamiento se reduce con la aparición de las gravas en el horizonte II C3.

### Características Físicas y Morfológicas del Pedón. Profundidad (cm.)

**0–22 (Ap):** Pardo amarillento oscuro (10 YR 3/4) en húmedo; franco arenosa; no plástico y ligeramente adhesivo; friable en húmedo; estructura de bloques subangulares gruesos, débiles. Raíces finas comunes; poros finos y medios comunes. Límite lineal, abrupto.

**22–31 (C1):** Pardo amarillento oscuro (10 YR 4/4) en húmedo; arena francosa fina, no plástico y no adhesivo; muy friable en húmedo; estructura de bloques subangulares finos y medios, fuertes. Raíces finas escasas; poros medios comunes. Límite lineal, abrupto.

**31–57 (C2):** Pardo amarillento oscuro (10 YR 4/4) en húmedo; arena francosa; no plástico y no adhesivo; muy friable en húmedo; estructura de bloques subangulares finos, débiles. Raíces finas escasas; poros medios comunes. Límite lineal, claro.



**57–85 (II C3):** Pardo grisáceo oscuro y pardo (10 YR 4/2 y 5/3) en húmedo; arenas con gravas finas y medias abundantes; no plástico y no adhesivo; muy friable en húmedo; estructura de bloques subangulares finos, débiles. Raíces finas escasas; poros medios comunes. Límite lineal, claro.

**85–120 (C):** Substrato de gravas y piedras con matriz arenosa, no hay raíces.

### **Observaciones**

El límite inferior del horizonte II C2 muestra una zona de 2 ó 3 cm. con un moteado escaso, fino, ligero y difuso, producto de un nivel freático ocasional, por diferentes texturas entre los materiales arenó francosa fina y las arenas del horizonte III C3.

### **Rango de Variaciones**

La profundidad efectiva del suelo varía entre 50 y 85 cm. Se estima que la temperatura media anual del suelo fluctúa entre 15° y 16°C. El drenaje varía de excesivo a bueno, ocasionalmente moderadamente bueno pero sólo en pequeños sectores. El horizonte Ap es de color pardo amarillento oscuro en tono 10 YR; textura franco arenosa; estructura de bloques subangulares finos, moderados a débiles; cuando predominan las texturas franco arenosas finas los bloques son gruesos, débiles y el espesor del horizonte varía entre 13 y 15 cm. Cuando la textura superficial es franco arcillo arenosa, los colores pueden variar de 7.5 YR 4/4 a 10 YR 3/4, el primero con arraigamiento escaso, el segundo asociado a arraigamiento común. El horizonte C1 varía en color de pardo grisáceo muy oscuro a pardo amarillento oscuro en tono 10 YR y la textura es areno francosa a franco arenosa, estructura de bloques subangulares finos o medios débiles y raíces escasas a comunes, ocasionalmente hay gravas finas aisladas. El horizonte C2 puede presentar una amplia gama de colores en el tono 10 YR, especialmente cuando se trata de textura arenosa; la textura dominante areno francosa se presenta asociada a colores 10 YR 4/4 ó 3.5/4 y a una estructura muy débil que desaparece con el aumento del contenido de las arenas. El horizonte II C3 varía en color por el elevado contenido de arenas y por el diferente tipo de ellas, fluctúa de 10 YR 4/2 a 10 YR 6/3, el contenido de gravas finas varía de 15 a 40%; las raíces desaparecen en la mayoría de los casos a los 60 cm., en un 20% de los casos alcanzan hasta los 65 a 68 cm.

### **Posición**

La Serie Estancilla se presenta ocupando la posición de abanicos aluviales y terrazas aluviales en valles interiores y cuencas pequeñas. La topografía dominante de los abanicos aluviales es de 1 a 3 % y de las terrazas de 0 a 1%.

## **3. SERIE LINGOLINGO (LGG)**

### **Caracterización General**

La Serie Lingolingo es un miembro de la Familia franca, mixta, térmica de los Typic Xerochrepts (Inceptisol). Suelos evolucionados, derivados de materiales graníticos, moderadamente profundos, que ocupan una posición de terraza alta (marina), disectada y adosada a los cerros de la costa. De color pardo oscuro en superficie en el tono 7.5 YR; textura franco arenosa y estructura de bloques subangulares, débiles; existe un horizonte lavado de color gris rosado en el tono 7.5 YR; de textura franco arenosa gruesa, con gran cantidad de cuarzo, no estructurada; que descansa sobre un horizonte B1, donde existen

dos materiales dispuestos en vetas, uno de color 5 Y 6/2 y de textura arenosa y otro, de color 7.5 YR 4/2 y textura arcillosa. El horizonte B2 es de color 5 YR 6/2; textura arcillo arenosa y sin estructura, pero que muestra vetas de color 7.5 YR 5/6. El horizonte C1 es de color pardo amarillento; textura franco arenosa y presenta vetas grises de color 7.5 YR 4/2.

### **Características Físicas y Morfológicas del Pedón. Profundidad (cm.).**

**0–22 (A1):** Pardo oscuro (7.5 YR 4/4) en húmedo; franco arenosa; no plástico y no adhesivo; friable; estructura de bloques subangulares finos y medios, débiles. Raíces finas escasas; poros finos escasos. Casquijos de cuarzo angulares comunes. Límite lineal, claro.

**22–36 (A3):** Gris rosado (7.5 YR 7/2 a 7/3) en húmedo; franco arenosa gruesa; no plástico y no adhesivo; muy friable; estructura maciza. Raíces finas escasas; poros finos escasos. Límite lineal, abrupto.

**36–53 (B1):** Gris oliva claro (5 Y 6/2) en húmedo; con 40% de pardo pálido (10 YR 6/3) en húmedo; franco arenosa; ligeramente plástico y no adhesivo; extremadamente firme; estructura maciza. Vetas de color 7 YR 4/2 y 7.5 YR 5/5; arcillosa. Raíces finas comunes. Casquijos abundantes. Límite lineal, abrupto.

**53–68 (B2):** Oliva pálido (5 Y 6/3) con vetas gruesas de color pardo oscuro (7.5 YR 4/2) en húmedo; franca; y pardo fuerte (7.5 YR 5/6) en húmedo que representan el 30% de la estrata; arcillo arenosa; muy plástico y muy adhesivo; firme; estructura maciza. Raíces escasas; poros escasos. Casquijos de cuarzo comunes. Límite lineal, abrupto.

**68–120 (C):** Pardo amarillento (10 YR 5/4) en húmedo; franco arcillo arenosa; ligeramente plástico y no adhesivo; extremadamente duro en seco; estructura maciza. Vetas gruesas de color pardo oscuro (7.5 YR 4/2); arcillo arenosa, raíces finas escasas hasta 95 cm. Sin raíces. Casquijos de cuarzo comunes.

### **Observaciones**

Al parecer se trata de depósitos marinos o lacustres muy antiguos de los que no existe evidencia en la literatura geomorfológica del área. Por la falta de orientación preferencial de los materiales, más parecería una arcilla marina que una lacustre.

### **Rango de Variaciones**

La profundidad efectiva del suelo varía entre 65 y 125 cm. La temperatura media anual del suelo se estima que varía entre 15° y 16° C. El horizonte A1 varía en color de pardo oscuro a pardo amarillento en los tonos 10 YR y 7.5 YR, los cromas varían de 2 a 4 y los valores de 3 a 4; la textura superficial varía de franco arenosa a franco arcillo arenosa y la estructura es siempre de bloques, fluctuando de finos a gruesos y de débiles a moderados. El horizonte A3 varía entre los tonos 10 YR y 7.5 YR, el cromas entre 2 y 3 y el valor entre 5 y 7; la textura es siempre la más gruesa de todo el pedón y generalmente no estructurada. El horizonte B1 se presenta en vetas, sin orientación preferencial, una de color gris (5 Y 6/2) y texturas moderadamente gruesas y la otra, de color pardo oscuro (7.5 YR 4/2); de texturas finas o moderadamente finas; no estructuradas. El horizonte B2 también presenta vetas de diferentes colores, pero de una sola textura que fluctúa entre arcillosa y arcillo arenosa, ocasionalmente es arcillo limosa; el color varía de 5 GY a 2.5 Y predominantemente, los cromas de 1 a 4 y los valores de 4 a 6. El horizonte C varía en color desde 5 G hasta 2.5 Y en los sectores de drenaje más restringido y de 10 YR a 7.5 YR en los sectores de mejor drenaje, los cromas varían de 1 a 6 y los valores de 4 a 6; el rango

de variación textural es también amplio, producto de las distintas texturas que se encuentran en las vetas, sin orientación preferencial y que varía de un punto a otro.

### **Posición**

La serie Lingolingo ocupa una posición de terraza alta remanente disectada, con topografía moderada a fuertemente ondulada.

## **4. SERIE LO VASQUEZ (LVZ)**

### **Caracterización General**

La Serie Lo Vásquez es un miembro de la Familia franca fina, mixta, térmica de los Ultic Haploxeralfs (Alfisol). Suelos evolucionados derivados de rocas graníticas, moderadamente profundos, de los cerros de la Cordillera de la Costa de Región Central. De color pardo rojizo oscuro en el matiz 5 YR y textura franco arcillo arenosa en la superficie, arcillosa en profundidad, con un contenido de casquijos de cuarzo que se incrementa junto con la proximidad de la roca descompuesta, donde toma un color rojizo amarillento en el matiz 5 YR y pardo amarillento oscuro en el matiz 7.5 YR, siendo la textura arcillo arenosa. Los materiales se encuentran bien estructurados en los primeros 40 ó 50 cm. y no presenta estructuras en profundidad. El substrato está constituido por rocas graníticas descompuestas.

### **Características Físicas y Morfológicas del Pedón. Profundidad (cm.)**

**0–18 (A1):** Pardo rojizo oscuro (5 YR 3/2) en húmedo; franco arcillo arenosa; ligeramente plástico y ligeramente adhesivo; friable; estructura de bloques subangulares y angulares finos, moderados. Raíces finas abundantes; poros finos y medios abundantes. Casquijos de cuarzo escasos. Límite ondulado, claro.

**18–32 (B21):** Pardo rojizo oscuro (5 YR 3.5/3, 70% y 2.5 YR 3/4, 30%), en húmedo; arcillosa; plástico y adhesivo; friable; estructura de bloques angulares medios, fuertes. Raíces finas abundantes; poros finos y medios abundantes. Casquijos de cuarzo escasos. Límite lineal, gradual.

**32–43 (B22t):** Pardo rojizo oscuro (2.5 YR 3/4) en húmedo; arcillosa; plástico y adhesivo; friable; estructura de bloques angulares medios, fuertes. Raíces finas abundantes; poros finos abundantes. Cutanes de arcilla delgados, discontinuos. Casquijos de cuarzo comunes. Límite lineal, gradual.

**43–57 (B23t):** Pardo rojizo (5 YR 4/3 a 4/4) en húmedo; arcillosa; plástico y adhesivo, friable; maciza. Raíces finas abundantes; poros finos comunes. Cutanes de arcilla delgados, continuos. Casquijos de cuarzo abundantes. Límite ondulado, gradual.

**57–78 (B3):** Pardo rojizo (5 YR 4/3) en húmedo a rojo amarillento (5 YR 5/8) en húmedo; arcillosa; plástico y adhesivo; maciza. Raíces finas abundantes y algunas raíces medias; poros finos comunes. No se observan cutanes. Casquijos de cuarzo, abundantes. Límite ondulado, gradual.

**78–115 (C1):** Pardo oscuro (7.5 YR 4/4) en húmedo; arcillo arenosa con casquijos de cuarzo muy abundantes. Raíces finas escasas y algunas raíces medias; poros finos y medios comunes. Límite ondulado, gradual.

**115 y más (R):** Roca granítica en diversos estados de meteorización.

## **Rango de Variaciones**

La profundidad efectiva del suelo varía entre 50 y 100 cm. La temperatura media anual del suelo se estima que fluctúa entre 15 y 16° C. El horizonte A presenta colores pardo muy oscuro en el matiz 10 YR, especialmente donde se ha producido acumulación de materiales antiguos; la textura varía entre franco arcillosa y franco arcillo arenosa. El horizonte B21 es siempre de color pardo rojizo, variando los valores de 2 a 4 y permaneciendo invariable los cromas en 2; la textura puede ser arcillo arenosa fina o muy fina, especialmente cuando no hay casquijos. El horizonte B22t varía en color de 2.5 YR 3/4 a 5 YR 3/3; la textura puede ser arcillo arenosa fina y la estructura prismática fina o media, moderada, que se parte en las estructuras que muestran los suelos en invierno, bloques angulares o subangulares medios, fuertes. El horizonte B23t varía en color de 5 YR 3/2 a 4.5/4 y de 2.5 YR 3/4 a 4/4; la textura puede ser arcillo arenosa fina si el contenido de casquijos es reducido; la estructura puede ser prismática fina, moderada, si el suelo se encuentra seco, en húmedo no hay estructuras. El horizonte B3 presenta variaciones principalmente de color dependiendo del grado y forma en que se altere la roca granítica.

## **Posición**

La serie Lo Vásquez ocupa la posición de cerros en la Cordillera de la Costa de la zona Central. Las pendientes dominantes son de 20 a 50 %

**ANEXO 2**  
**PRECIPITACIONES EN ALTO LOICA.**

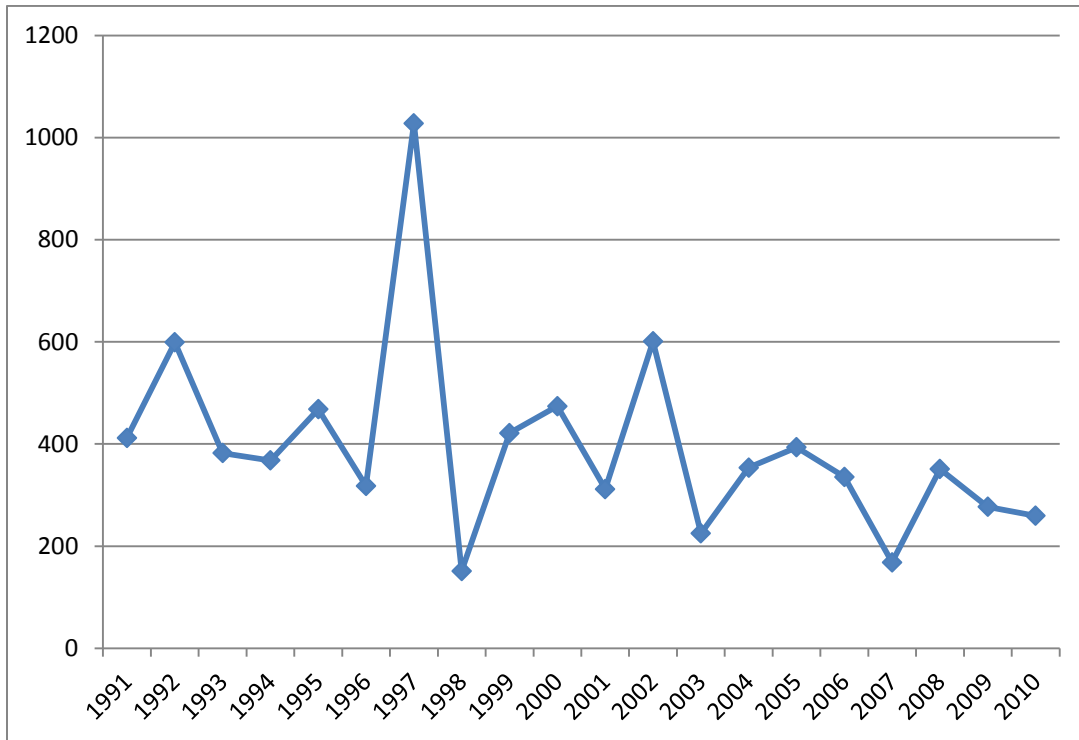
<b>Año</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>	<b>TA<sup>121</sup></b>
1990	0,0	0,0	5,0	0,9	13,0	2,3	58,4	51,0	56,6	23,3	0,0	0,0	<b>210,5</b>
1991	0,0	0,0	0,0	35,8	126,0	185,2	0,0	0,0	41,9	0,0	0,0	23,1	<b>412,0</b>
1992	0,0	0,0	5,6	35,7	110,5	126,4	58,6	76,5	119,7	45,7	20	0,3	<b>599,0</b>
1993	0,0	0,0	0,0	43,3	135,0	23,0	157,0	20,0	0,0	0,0	4,0	0,0	<b>382,3</b>
1994	0,0	0,0	0,0	60,0	80,0	80,5	89,8	6,0	32,2	17,2	0,0	2,1	<b>367,8</b>
1995	0,0	0,0	0,0	80,7	0,0	157,2	137,6	74,8	8,7	8,9	0,0	0,0	<b>467,9</b>
1996	0,0	0,0	0,4	29,5	12,5	63,6	93,4	104,1	4,0	0,9	3,6	6,0	<b>318,0</b>
1997	0,0	0,0	0,0	14,7	112,3	373,5	75,9	198,3	125,0	106,3	21,9	0,0	<b>1027,9</b>
1998	0,0	0,0	0,0	29,5	44,9	23,3	0,5	1,5	51,5	0,0	0,0	0,0	<b>151,2</b>
1999	0,0	0,0	14,5	5,5	46,5	97,5	33,5	72,0	143,8	7,5	0,5	0,0	<b>421,3</b>
2000	0,0	14,7	0,0	17,6	20,0	261,5	28,5	0,5	116,5	13,6	1,0	0,0	<b>473,9</b>
2001	0,0	0,0	9,9	16,1	32,2	0,3	186,6	50,2	15,8	0,7	0,0	0,0	<b>311,8</b>
2002	0,0	0,0	1,7	13,6	137,9	247,5	92,3	74,2	28,3	4,0	0,0	1,3	<b>600,8</b>
2003	0,0	0,0	0,5	0,0	79,7	31,5	72,9	7,4	3,3	20,6	9,0	0,0	<b>224,9</b>
2004	0,0	0,0	7,6	39,2	10,4	44,1	95,2	55,9	23,7	52,9	24,8	0,0	<b>353,8</b>
2005	0,0	0,0	1,1	5,7	54,4	146,5	27,8	137,3	16,3	4,5	0,0	0,0	<b>393,6</b>
2006	0,0	0,0	0,6	2,9	7,3	79,8	130,0	50,3	37,5	22,5	4,7	0,0	<b>335,6</b>
2007	0,0	0,0	0,6	0,0	16,3	69,9	35,4	29,6	0,6	8,9	7,1	0,0	<b>168,4</b>
2008	0,0	0,0	0,5	15,6	27,8	90,4	75,3	110,5	10,5	20,2	0,0	0,0	<b>350,8</b>
2009	0,0	0,0	1,2	22,5	38,5	72,9	45,6	69,7	11,4	7,5	7,5	0,0	<b>276,8</b>
2010	0,0	0,0	0,6	5,4	37,5	80,7	36,9	24,7	62,9	6,3	4,5	0,0	<b>259,5</b>
$\pi^{122}$	0,00	0,70	2,37	22,58	56,14	99,81	72,91	57,83	43,34	17,69	5,17	1,56	<b>386,09</b>
AN <sup>123</sup>	0,0	0,4	3,2	13,4	60,2	70,4	86,6	51,8	40,0	18,4	9,2	2,1	<b>356</b>

Fuente: Dirección meteorológica de Chile

<sup>121</sup> Total anual (mm)

<sup>122</sup> Promedio mensual (mm)

<sup>123</sup> Precipitación en un año normal (mm)



**Precipitación anual en Alto Loica periodo 1990 – 2010.** Salvo un periodo de intensa actividad pluviométrica en 1997, las precipitaciones en Alto Loica han disminuido paulatinamente desde el año 1990. Fuente: Dirección meteorológica de Chile<sup>124</sup>

<sup>124</sup> DIRECCIÓN METEOROLÓGICA DE CHILE. Dirección general de aeronáutica civil (DGAC). 4 de agosto de 2015. < <http://www.meteochile.gob.cl/pronosticoregion.php?reg=05m>>

**ANEXO 3**  
**SISTEMA DE CUANTIFICACIÓN DEL RECURSO PAISAJE**

a) **Tabla para la cuantificación de los atributos físicos del paisaje (Téllez, 2001).**

ATRIBUTOS FISICOS DEL PAISAJE						
<b>1. Agua</b>						
A	Tipo	Pantanosas	Arroyo	Río	Lago/Panta.	Mar
B	Orillas	Sin Veg.		Con Veg.		Mucha Veg
C	Movimiento	Ninguno	Ligero	Meandros		Cascada
D	Cantidad	Baja		Media		Alta
E	Visibilidad	Baja				Normal
<b>2. Forma de Terreno</b>						
A	Tipo	Llano	Fdo Montaña	Colina	Rel. LLamat.	Montañoso
<b>3. Vegetación</b>						
A	Cubierta	< 5 %	5 – 25 %	25 – 50 %	50 – 75 %	> 75 %
B	Diversidad	Poca		Presente		Bastante
C	Calidad	Regular		Buena		Muy buena
D	Tipo	Cult. seco	Cult. verde	Arbustivo	Pradera	Arbóreo
E	Visibilidad	Baja				Normal
<b>4. Nieve</b>						
A	Nieve	< 5 %	5 – 25 %	25 – 50 %	50 – 75 %	> 75 %
<b>5. Fauna</b>						
A	Presencia	Presente		Notable		Abundante
B	Interés	Mínimo		Medio		Bueno
C	Visibilidad	Mínima		Media		Buena
<b>6. Usos del Suelo</b>						
A	Tipo	Industrial	Urbano	Pueblo	Rural	Natural
<b>7. Vistas</b>						
A	Amplitud	< 45	45 – 90°	90 – 180°	180 – 270°	> 270
B	Tipo	Baja		Media		Panorámica
<b>8. Sonidos</b>						
A	Presencia	Presentes		Indiferentes		Abundantes
B	Tipo	Molestos		Indiferentes		Armoniosos
<b>9. Olores</b>						
A	Presencia	Presentes		Indiferentes		Abundantes
B	Tipo	Molestos		Indiferentes		Armoniosos
<b>10. Recursos Culturales</b>						
A	Presencia	Ausentes		Presentes		Abundantes
B	Tipo	Popular				Históricos
C	Visibilidad	Mínima		Media		Buena
D	Interés	Mínimo		Medio		Interesante
<b>11. Elementos que alteran el paisaje</b>						
A	Intrusión	Ausente		Bajo	Media	Alto
B	Fragmenta.	Ausente		Algo	Medio	Bastante
C	l. Horizonte	Ausente		Algo	Medio	Bastante
D	Tapa vista	Ausente		Algo	Media	Bastante

b) **Tabla para la cuantificación de los atributos estéticos del pasaje (Téllez, 2001).**

<b>ATRIBUTOS ESTETICOS DEL PAISAJE</b>				
<b>1. Forma</b>				
<b>A</b>	Diversidad	Mínima	Media	Dominante
<b>B</b>	Contraste	Mínimo	Medio	Alto
<b>C</b>	Compatibilidad	No		Si
<b>2. Color</b>				
<b>A</b>	Diversidad	Mínima	Media	Dominante
<b>B</b>	Contraste	Mínimo	Medio	Alto
<b>C</b>	Compatibilidad	No		Si
<b>3. Textura</b>				
<b>A</b>	Diversidad	Alguna		Dominante
<b>B</b>	Compatibilidad	No		Si
<b>4. Unidad</b>				
<b>A</b>	Estructural	Alguna		Dominante
<b>B</b>	Proporción	Alguna		Dominante
<b>5. Expresión</b>				
<b>A</b>	Presencia	Alguna		Dominante



c) Sistema de puntuación para la determinación de la calidad de los atributos físicos de un paisaje (Téllez, 2001).

Parámetro x	Variable i	PARÁMETRO		$P_{xi}=V_{xi}$	$f_{xi}$	Fórmula
		Variable	Valores			
1	<b>Agua</b>					
	A	Tipo	Z. pantanosa	4	-	Tipo 1 $V_{1A}=P_{1A}$
			Arroyo	2	-	
			Río	3	-	
			Lago/embalse	5	-	
			Mar	15	-	
B	Orillas	Sin vegetación	-	0	$V_{1B}=f_{1B} V_{1A}$	
		Con vegetación	-	0,5		
		Mucha vegetación	-	1		
C	Movimiento	Ninguno	0	-	Tipo 1	
		Ligero	0,5	-		
		Meandros	1	-		
		Rápidos	5	-		
		Cascada	10	-		
D	Cantidad	Baja	1	-	Tipo 1	
		Media	2	-		
		Alta	3	-		
E	Visibilidad	Baja	-	0,5	$V_{1E}=f_{1E} \sum V_{1i}$	
		Normal	-	1		
2	<b>Forma del terreno</b>					
	A	Tipo	Llano	0	-	Tipo 1
			Fondo montaña	2	-	
			Colinas	4	-	
			Rel. llamativo	8	-	
Montañoso			10	-		
3	<b>Vegetación</b>					
	A	Cubierta	< 5%	0	-	Tipo 1
			5-25%	1	-	
			25-50%	2	-	
			50-75%	2,5	-	
			>75%	3	-	
	B	Diversidad	Poca	-	0,5	Tipo 2 $V_{3B}=f_{3B} V_{3A}$
			Presente	-	1	
			Bastante	-	1,5	
	C	Calidad	Regular	-	1	Tipo 2 $V_{3C}=f_{3C} V_{3A}$
			Buena	-	2	
Muy Buena			-	3		
D	Tipo	Cultivo seco	-	0,25	Tipo 2 $V_{3D}=f_{3D} V_{3A}$	
		Cultivo verde	-	0,5		
		Arbustivo	-	0,75		
		Pradera	-	1		
		Arbóreo	-	1,5		
E	Visibilidad	Baja	-	0,5	$V_3=f_{3E} \sum V_{3i}$	
		Normal	-	1		

Continuación

Parámetro x	Variable i	PARÁMETRO		$P_{xi}=V_{xi}$	$f_{xi}$	Fórmula
		Variable	Valores			
4	<b>Nieve</b>					
	A	Cubierta	<5%	0	-	Tipo 1
			5-25%	2	-	
			25-50%	5	-	
			50-75%	7	-	
>75%			15	-		
5	<b>Fauna</b>					
	A	Presencia	Presente	1	-	Tipo 1
			Notable	2	-	
			Abundante	3	-	
	B	Interés	Mínimo	-	1	Tipo 2 $V_{5B}=f_{5B} V_{5A}$
			Medio	-	2	
			Buena	-	3	
	C	Visibilidad	Mínima	-	1	Tipo 2 $V_{5C}=f_{5C} V_{5A}$
			Media	-	2	
Buena			-	3		
6	<b>Usos del suelo</b>					
	A	Tipo	Industrial	0	-	Tipo 1
			Urbano	1	-	
			Pueblo	5	-	
			Rural	10	-	
Natural			15	-		
7	<b>Vistas</b>					
	A	Amplitud	< 45°	0	-	Tipo 1
			45-90°	0,5	-	
			90-180°	1	-	
			180-270°	1,5	-	
			>270°	2	-	
	B	Tipo	Baja	-	1	Tipo 2 $V_{7B}=f_{7B} V_{7A}$
Media			-	2		
Panorámica			-	3		
8	<b>Sonidos</b>					
	A	Presencia	Presente	1	-	Tipo 1
			Indiferentes	2	-	
			Dominantes	3	-	
	B	Tipo	Molestos	-	1	Tipo 2 $V_{8B}=f_{8B} V_{8A}$
Indiferentes			-	1		
Armoniosos			-	2		

Continuación

Parámetro x	Variable i	PARÁMETRO			$P_{xi}=V_{xi}$	$f_{xi}$	Fórmula	
		Variable	Valores					
9	<b>Olores</b>							
	<b>A</b>	Presencia	Presentes Indiferentes Dominantes		1 2 3	- - -	Tipo 1	
	<b>B</b>	Tipo	Molestos Indiferentes Armoniosos		- - -	1 2 3	Tipo 2 $V_{9B}=f_{9B}$ $V_{9A}$	
10	<b>Recursos culturales</b>							
	<b>A</b>	Presencia	Presentes Notables Abundantes		1 2 3	- - -	Tipo 1	
	<b>B C D</b>	Tipo Visibilidad Interés	B	Mínima Media Buena	D	-	0,5 1,0 1,5 1 1,5 2 1 2 3 2 3 4	Tipo 2 $V_{10B,C,D}=$ $f_{10B,C,D} V_{10A}$
			P		Mínimo			
			O		Medio			
			P		Interés			
			U					
			L					
			A		Mínimo			
			R		Medio			
			Interés					
H			Mínimo					
I	Medio							
S	Interés							
T								
O								
R	Mínimo							
I	Medio							
C	Interés							
O								
11	<b>Elementos que alteran el paisaje</b>							
	<b>A</b>	Intrusión	Baja Media Alta		-0,5 -1 -2	- - -	Tipo 1	
	<b>B</b>	Fragmentación	Algo Medio Bastante		- - -	1 3 6	Tipo 2	
	<b>C</b>	Tapa Línea del horizonte	Algo Medio Bastante		- - -	0,25 0,25 0,5	Tipo 2	
	<b>D</b>	Tapa vistas	Algo Medio Bastante		- - -	0,25 0,25 0,5	Tipo 2	

- d) Sistema de puntuación para la determinación de la calidad de los atributos físicos de un paisaje (Téllez, 2001).

Parámetro x	Variable i	PARÁMETRO		$P_{xi}=V_{xi}$	$f_{xi}$	Fórmula
		Variable	Valores			
1	<b>Forma</b>					
	A	Diversidad	Mínima	1	-	Tipo 1
			Media	2	-	
			Dominante	5	-	
	B	Contraste	Mínimo	1	-	Tipo 1
			Medio	2	-	
Alto			5	-		
C	Compatibilidad	No	-	-1,5	Tipo 2	
		Sí	-	0,5		
2	<b>Color</b>					
	A	Diversidad	Mínima	1	-	Tipo 1
			Media	2	-	
			Dominante	5	-	
	B	Contraste	Mínimo	1	-	Tipo 1
			Medio	3	-	
Alto			7	-		
C	Compatibilidad	No	-	-1,5	Tipo 2	
		Sí	-	0,5		
3	<b>Textura</b>					
	A	Contraste	Alguno	2	-	Tipo 1
			Dominante	6	-	
	B	Compatibilidad	No	-	-1,5	Tipo 2
Sí			-	0,5		
4	<b>Unidad</b>					
	A	Líneas estructurales	Alguna	0	-	Tipo 1
			Dominante	5	-	
	B	Proporción	Alguna	0	-	Tipo 1
Dominante			7	-		
5	<b>Expresión</b>					
			Alguna	8	-	Tipo 1
			Dominante	15	-	

## ANEXO 4

### DETERMINACION DEL VOLUMEN DE POROS DEL SUELO

Textura	Densidad Aparente				
	Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy alta
T	< 0,6	0.6 – 0.9	0.9 – 1.2	1.2 – 1.5	> 1.50
tL	< 0,6	0.6 – 0.9	0.9 – 1.25	1.26 – 1.55	> 1.55
L, U	< 8,8	0.8 – 1.15	1.16 – 1.35	1.36 – 1.6	> 1.60
S	< 1,0	1.0 – 1.2	1.2 – 1.4	1.4 – 1.65	> 1.65

Evaluación de la densidad aparente del suelo. Schlatter, et al, 2003.

Textura	CAPACIDAD DE AIRE (CA)			CAPACIDAD DE CAMPO (CP)			CAPACIDAD DE AGUA APROVECHABLE (CAA)		
	Poros > 50 µm			Poros < 50 µm			Poros 50 µm – 0,2		
	Densidad Aparente								
	Baja	Media	Alta	Baja	Media	Alta	Baja	Media	Alta
<b>Arena</b>									
gS	35	29	21	9	9	9	6	6	6
mS	27	24	19	14	12	12	10	9	9
fS	27	23	20	25	18	16	16	12	12
uS	19	17	9	31	24	24	21	18	17
ulS	15	12	8	34	30	27	24	19	17
l'S	23	19	11	27	22	21	20	16	14
lS	19	15	9	33	27	26	23	16	15
t'S	19	18	13	29	22	20	18	14	13
tS	16	13	8	32	27	22	20	15	13
<b>Limo</b>									
sU, U	15	11	7	36	33	30	27	23	21
slU	13	9	5	37	33	30	26	22	20
l', - lU	14	8	5	39	36	33	27	25	21
<b>Franco</b>									
sL, suL	14	10	6	38	33	31	22	17	14
slU	12	9	5	40	36	33	24	19	16
utL	10	7	4	47	42	38	21	17	12
stL, t'-tL	11	7	4	47	41	36	20	15	12
<b>Arcilla</b>									
uT	10	7	4	47	42	38	21	17	11
lT, uT, T	8	4	2	57	52	47	26	15	11

Distribución de poros (% volumen) según textura y densidad aparente del suelo. Fuente: Schlatter, et al, 2003.

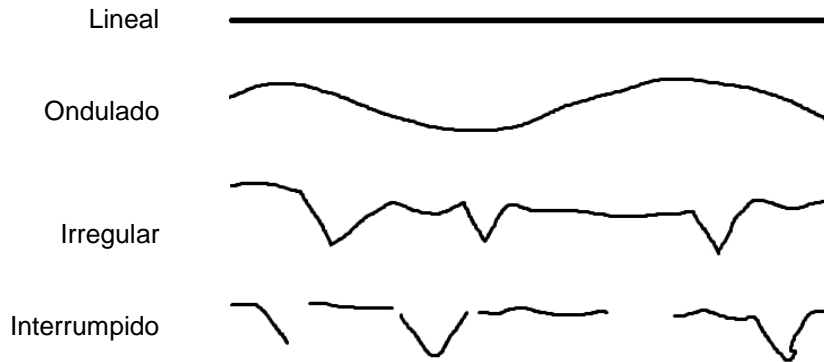
## ANEXO 5

### PARAMETROS DE ANALISIS DE CALICATAS

Los parámetros de análisis de calicatas fueron descritos por Schlatter y colaboradores (2003); se detallan sus características y parámetros de clasificación

#### a) Límites

##### Forma



**Formas más comunes de los límites entre horizontes.** Los límites entre los horizontes o fronteras pueden ser distintos en función de las características propias del suelo y los procesos de formación de éste, tales como meteorización, deposición, desgaste, etc...

##### Nitidez

- Abrupto: límite nítido y transición < 1 cm
- Claro: límite muy visible, transición 1 – 2 cm
- Gradual: límite poco visible, transición entre 2 – 10 cm
- Difuso: límite no identificable, transición > 10 cm

#### b) Presencia de raíces

##### Contenido de raíces finas

Denominación	Cantidad (raicillas finas / dm <sup>2</sup> )
Sin	Sin raíces finas reconocibles
Leve	1 – 2
Poco	2 – 5
Mediano	5 – 10
Fuerte	10 – 20
Denso	20 – 50
Filtro de raíces	> 50

**Parámetros de clasificación para la cantidad de raíces.** El valor de la cantidad de raíces es importante para el cálculo de la oferta de agua y de los elementos nutritivos disponibles. El valor se obtiene analizando 1dm<sup>2</sup> de suelo.

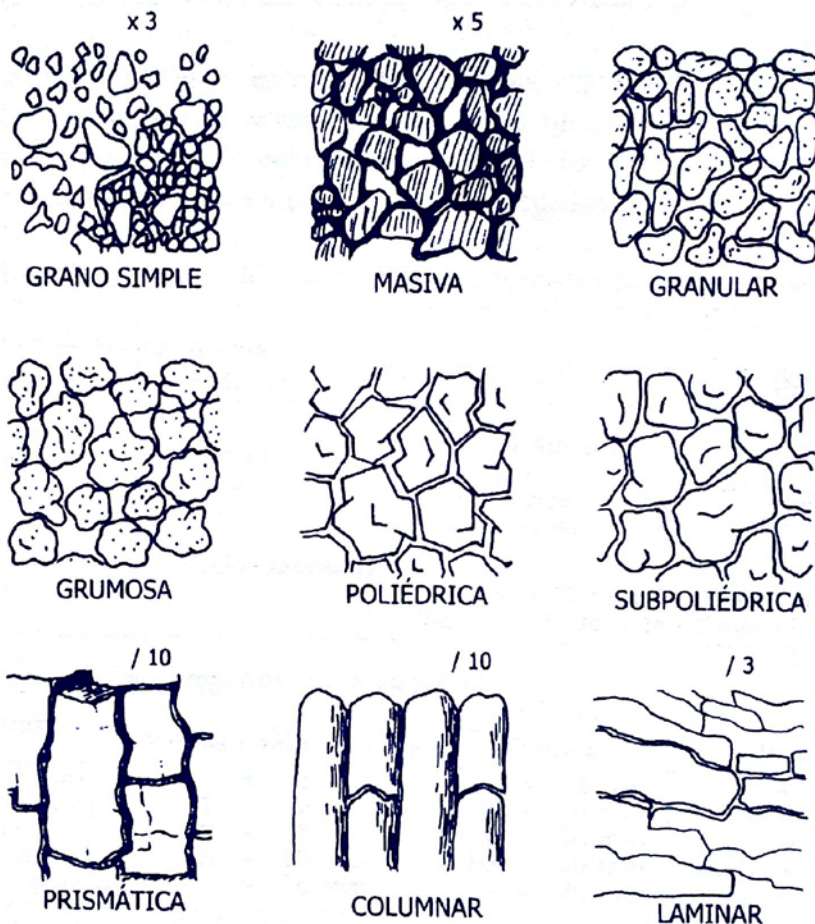
## Tamaño

Denominación	Diámetro (mm)
Muy finas	< 1
Finas	1 – 2
Medianas	2 – 5
Gruesas	> 5

**Parámetros de clasificación del tamaño de las raíces.** La tabla indica la denominación y los parámetros para clasificar las raíces según su tamaño. Este dependerá del tipo de vegetación presente y la antigüedad de la vegetación existente. Los bosques milenarios tendrán raíces de mayor tamaño en comparación a las plantaciones forestales en suelos erosionados.

### c) Estructura

La estructura macroscópica es visible a simple vista y se clasifica observando la constitución de los perfiles. La estructura puede ser con agregación o sin agregación (ver capítulo 4). La figura 5.16 muestra las distintas estructuras de suelos con la cual se efectúa la clasificación de este criterio.

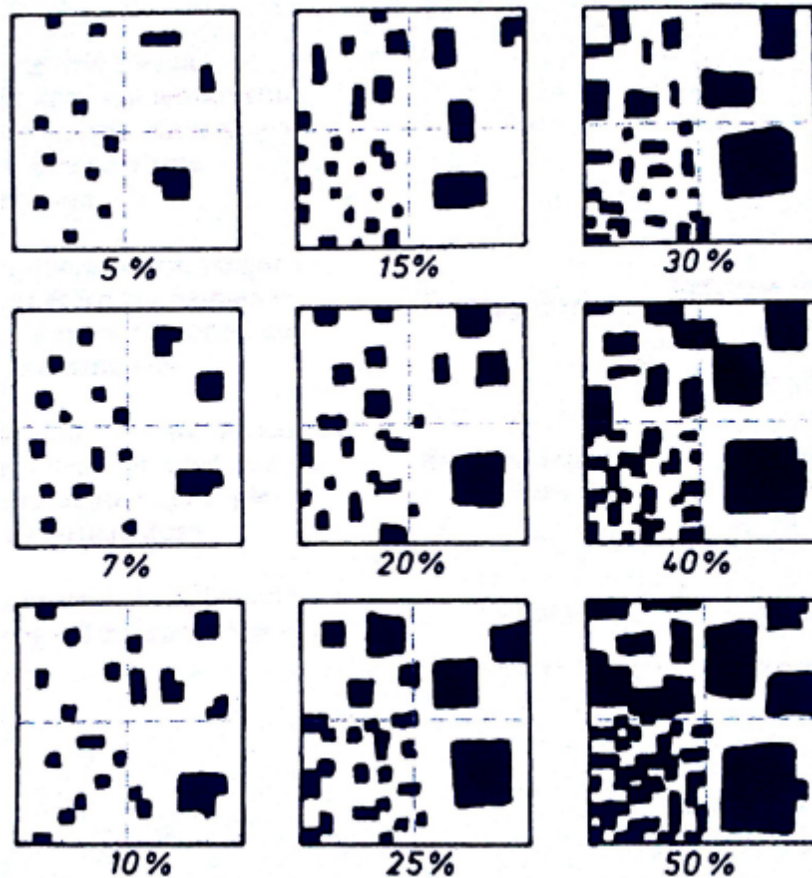


#### Diagrama para la clasificación de la estructura del suelo.

La estructura es el ordenamiento espacial de los componentes del suelo. Influye significativamente los regímenes de agua y aire de un suelo, como a su vez su arraigabilidad. En la figura se observan las estructuras con y sin agregación

#### d) Pedregocidad

Para la pedregocidad se determina la fracción mineral mayor a 2 mm Ø, se determina mediante la comparación de tamaños; y la fracción mineral fina menor a 2 mm Ø, denominada suelo fino se determina a través de la prueba al tacto



**Diagrama para la estimación de la participación porcentual de esqueleto (gravas y piedras), moteado, concreciones y otros aspectos visibles (o atributos) en la pared del perfil del suelo.** Esta metodología es ampliamente usada para la determinación en terreno.

La figura anterior muestra los porcentajes de pedregocidad del suelo. Básicamente corresponde al esqueleto del suelo en el cual se encontrarán las diferentes fracciones cuantificables del suelo (arena, arcilla y limo) que darán origen a la textura. Cada cuadro representa aproximadamente una muestra real de 4 cm.

La pedregocidad se obtiene en terreno utilizando la figura anterior como elemento patrón, la cual puede cambiar según las características del suelo analizado (altitud, pendiente o meseta, presencia de vegetación, etc.). Las clasificaciones para los porcentajes de pedregocidad se muestran en la siguiente tabla.



Denominación	Volumen (%)
Muy bajo	< 1
Bajo	1 – 10
Moderado	10 – 25
Alto	25 – 50
Muy alto	50 – 75
Esquelético	> 75

**Escala de valores para el porcentaje de pedregocidad.** Su determinación se efectúa separada por horizontes o subhorizontes y se hace referencia a un volumen de suelo.

### e) Profundidad del suelo

#### *Fisiológica*

“Es la profundidad potencialmente arraigable y desde la cual las plantas pueden extraer agua y elementos nutritivos necesarios para su desarrollo” (Schlatter, et al, 2003.). Se determina analizando el perfil en las calicatas y las características del suelo, tales como densidad, concentración de elementos químicos, etc...

Profundidad (cm)	Clase de profundidad
0 – 20	Muy delgado
20 – 40	Delgado
40 – 70	Moderadamente profundo
70 – 120	Profundo
> 120	Muy profundo

**Clases de profundidad fisiológica del suelo.** Esta profundidad es la que mayor interés concita en el estudio de suelos, ya que, es importante para evaluar la fertilidad del suelo.

#### *Efectiva*

“Corresponde a la profundidad que efectivamente está relacionada con el volumen arraigable, descontado el volumen de pedregocidad” (Schlatter, et al, 2003). Se calcula descontando de la profundidad fisiológica la proporción correspondiente al volumen ocupado por el esqueleto del suelo. Para ello se calcula mediante la siguiente ecuación propuesta por Schlatter y colaboradores (2003)

$$\text{Profundidad efectiva} = \text{Profundidad fisiológica} \times (1 - \% \text{ Pedregocidad}/100)$$

### f) Color

El color es una característica que permite inferir elementos como materia orgánica, naturaleza del material parental y el grado de meteorización mineral, para ello se realiza en terreno con la tabla Munsell.

## g) Densidad

### *Aparente*

La densidad aparente considera el volumen de poros y se obtiene masando una muestra de suelo, obtenido posteriormente su volumen para calcular la densidad.

### *Real*

Para el cálculo de la densidad real se trabaja con las siguientes tres ecuaciones descritas por Schlatter y colaboradores (2003).

$$Vp = CA + CC$$

Donde<sup>125</sup>

Vp : Volumen de poros  
CA : Capacidad de aire  
CC : Capacidad de campo

$$DR = \frac{DA}{\left(1 - \frac{Vp}{100}\right)}$$

Dónde:

DR : Densidad real  
DA : Densidad aparente

Sin embargo, es necesario corregir la DR en función de la materia orgánica presente para ajustar el valor final

$$DRc = DR - 0,0135 \times \%MO$$

Dónde:

DRc : Densidad real corregida  
MO : Materia orgánica

---

<sup>125</sup> Los valores descritos se obtienen por tabla en función de la densidad aparente, textura y materia orgánica.

## h) Material de origen

El material de origen se refiere a los materiales minerales u orgánicos inconsolidados de los cuales se forman los suelos

Tipo de material	Características
<b>Materiales transportados no consolidados</b>	
Sedimentos aluviales o fluviales	Transportados por el agua, dando origen a sedimentos de grava, arena o limo o bien mezclas de ellos.
Sedimentos lacustres	Sedimentos depositados en aguas tranquilas, estratificadas en capas delgadas
Sedimentos glaciales	Mezclas de fracciones de diferentes tamaños, sin estratificación ni ordenación
Sedimentos eólicos	Limo y arenas transportados por el viento como dunas (arena), loess (limo y arena fina) y cenizas volcánicas (piroclástico)
Sedimentos coluviales	Fragmentos desordenados, acumulados en la base de laderas, depresiones o márgenes de arroyos.
<b>Materiales transportados consolidados</b>	Materiales sedimentarios que sufrieron un proceso de compactación y/o diagénesis.
<b>Materiales no transportados</b>	Materiales que forman o subyacen en el suelo y que provienen de rocas ígneas o metamórficas

**Parámetros para el reconocimiento del material de origen.** De una forma u otra el material mineral del cual se forman los suelos proviene de rocas compactas. Sin embargo, por efecto mecánico de transporte son fragmentadas y forman sedimentos mixtos desde los cuales puede evolucionar un suelo.

## i) Textura

Corresponde a la combinación cuantitativa de las partículas minerales que componen el suelo (arena, arcilla y limo) y que se agrupan en las denominadas fracciones granulométricas (Schlatter, et al, 2003). La determinación de la textura se efectúa de la siguiente manera según la metodología descrita por Schlatter y colaboradores (2003):

- Tomar una muestra de suelo, romper los agregados del suelo y homogeneizar el suelo fino
- Humedecer las muestras de suelo
- Frotar y amasar el suelo entre los dedos palpando la granulación, cohesión y plasticidad
- Según estas últimas características, determinar la textura clasificando el tipo de suelo en la tabla descrita a continuación

Clase de suelo	Símbolo	Textura	Características
Arena	S	Granos visibles y palpables; áspero (mientras más fino, menos áspero)	Sin cohesión, no se adhiere al dedo, no moldeable
Arena limosa	uS	Granos bien visibles y palpables; se encuentra añadida algo de sustancia fina	Sin cohesión, harinoso y áspero; algo de sustancia fina queda adherida al dedo, no moldeable
Arena levemente franca	l'S	Como 2, menos áspero al tacto	Levemente cohesionado, algo de sustancia fina se adhiere al dedo, no moldeable
Arena franca	IS	Granos visibles y palpables, con bastante sustancia fina, pero aún áspero	Algo cohesionable, levemente untuoso, la sustancia fina se adhiere al dedo, poco moldeable, se parte en caso de cualquier deformación
Arena arcillosa	tS	Granos bien visibles y palpables, con mucha sustancia fina, aun áspero.	Algo cohesionable, leve tenacidad, la sustancia fina se adhiere al dedo, poco a moderadamente moldeable
Limo	U	Granos individuales no identificables, aterciopelado al tacto, harinoso	No cohesionable, no untuoso, se adhiere bien a las líneas de la mano, poco o no moldeable, se rompe a cualquier deformación
Limo arenoso	sU	Granos individuales bien poco visibles; algo aterciopelado al tacto, aún algo áspero	Como en caso anterior pero casi no moldeable
Limo arcilloso	tU	Granos no identificables, aterciopelado, harinoso pero más plástico que el limo	Levemente cohesionable, untuoso, se adhiere bien, moderadamente moldeable, se parte y rompe fácilmente en caso de deformación
Franco arenoso	sL	Algunos granos aun visibles y palpables, mucha sustancia fina	Poco cohesionable se adhiere al dedo, algo untuoso, es moldeable, arrollable con un diámetro como el de un lápiz, se agrieta fácilmente

**Estimación de la textura en terreno por la prueba al tacto en húmedo.** Con este procedimiento se establece la clase de suelo; contempla principalmente 14 tipos de suelos distintos en función de la cantidad de cada uno de sus componentes.

Continuación

Clase de suelo	Símbolo	Textura	Características
Franco arcilloso	tL	Mucha sustancia fina, superficies de corte levemente brillantes	De gran cohesión, adherible, untuoso, bien moldeable y arrollable, no se agrieta
Arcilla arenosa	sT	Mucha sustancia fina, granos poco visibles pero si palpables, superficie de frotación o corte algo brillante	De gran cohesión, se adhiere, untuoso, bien moldeable y arrollable
Arcilla limosa arcilla franca	IT uT	Sin granos visibles ni palpables, algo aterciopelado al tacto, algo harinoso (limoso), superficie de frotación o corte algo brillante	De gran cohesión, adherible, untuoso, bien moldeable y arrollable
Arcilla	T	Sin granos visibles ni palpables, muy plástico. Superficie de frotación o corte bien brillante	De gran cohesión, se adhiere, untuoso, muy bien moldeable y arrollable

## j) Consistencia

Comportamiento del suelo	Consistencia	
	Suelo seco	Suelo húmedo
No coherente (arenas)	Suelto	Suelto
Se rompe ante cualquier fuerza débil, aplicada suavemente entre el pulgar e índice	Blando	Muy friable
Se rompe ante una fuerza suave aplicada entre pulgar e índice. En la yema de los dedos se siente una leve presión	Ligeramente duro	Friable
Se rompe ante una fuerza moderada aplicada suavemente entre pulgar e índice	Moderadamente duro	Firme
Se rompe ante una fuerza pronunciada aplicada lentamente entre índice y pulgar. En la yema de los dedos se siente una moderada presión	Duro	Muy firme
No puede romperse entre pulgar e índice pero si entre las palmas de ambas manos en movimiento, con una fuerza pronunciada	Muy duro	Extremadamente firme
No se puede romper entre las manos, pero si con el peso total del cuerpo aplicado lentamente bajo el pie sobre una superficie dura	Extremadamente duro	Algo rígido
No puede romperse, ni aplicando toda la fuerza del cuerpo sobre el pie	Rígido	Rígido

**Consistencia según clase de humedad, en base a la resistencia a la ruptura de terrones de suelo.** La consistencia del suelo cambia en condiciones secas y húmedas, la tabla muestra una metodología para usar en terreno para determinar la consistencia del suelo.

“Comprende las propiedades del suelo que se expresan por el grado de cohesión y adhesión, o bien por la resistencia a la deformación o ruptura” (Schlatter, et al, 2003). Existen diferentes métodos para evaluar esta propiedad del suelo; la metodología empleada será el método de terreno basado en comprimir terrones desprendidos naturalmente del suelo en estado húmedo y seco, según la pauta descrita por Schlatter y colaboradores (2003)

- Seco: La consistencia de los materiales edáficos cuando están secos se caracterizan por la rigidez, fragilidad, resistencia máxima a la presión, mayor o menor tendencia a volverse polvo o fragmentos con bordes más bien pronunciados e imposibilidad de volverse a juntar el material en una masa coherente (Schlatter, et al, 2003). .
- Húmedo: La consistencia cuando el suelo esta húmedo se determina con una humedad aproximada a la capacidad de campo o algo menor (Schlatter, et al, 2003). .

### k) Erosión

Características del suelo	Categoría de erosión
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pérdida de menos del 25% del horizonte A o de los primeros 20 cm de suelo mineral si el horizonte A es de un espesor menor a 20 cm.</li> <li>• El espesor del horizonte superficial está dentro del rango de variación natural del suelo sin erosión.</li> <li>• Alrededor de un 20 % del área afectada presenta en forma dispersa sectores de desgaste apreciable</li> </ul>	<b>Ligera</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• El suelo ha perdido en promedio 25 – 75% del horizonte A o de los primeros 20 cm del suelo mineral sin erosión.</li> <li>• Presencia de una mezcla del horizonte A o superficial residual con material del horizonte subyacente</li> </ul>	<b>Moderada</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Perdido del 75 % del horizonte A o superficial de los primeros 20 cm del suelo mineral si el horizonte A fue originalmente delgado.</li> <li>• Afloramiento del suelo mineral que subyace al horizonte A o superficial.</li> <li>• Alta densidad de surcos y aparición de cárcavas de menor profundidad a profundidad moderada.</li> </ul>	<b>Severa</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pérdida del horizonte A o de los 20 cm superiores del suelo mineral cuando el horizonte A es delgado.</li> <li>• Afloramiento del horizonte B en toda el área.</li> <li>• Presencia de surcos y cárcavas, en general moderadas a profundas</li> </ul>	<b>Muy severa</b>

**Procedimiento para la determinación de la categoría de erosión.** La clasificación del tipo de erosión se basa en criterios estandarizados en función de la pérdida de los estratos superiores,

## I) Humedad

La humedad actual caracteriza la saturación del suelo con agua en el momento de la descripción del perfil (Sylke, 2005). Se utiliza la siguiente escala de valores:

Disgregar un terrón	Formar una pelota	Humedecer	Frotar entre manos	Humedad
Polvoriento	No ligante	Oscurece fuertemente	Sin cambio de color	Árido
No polvoriento	No ligante	Oscurece considerablemente	Más claro	Seco
No polvoriento	Moldeable	No oscurece	Claro	Semihúmedo
Pegado / Plástico	Humedecer la mano	No oscurece	Claro	Húmedo
Pastoso	La muestra se escurre	No oscurece	Claro	Mojado

**Tabla para estimar la humedad actual del suelo.** La tabla indica la metodología para determinar la humedad del suelo en terreno considerando aspectos como moldeabilidad y cambio de color entre otros.



## ANEXO 6

### OBRAS DE RESTAURACION HIDROLOGICO FORESTAL IMPLEMENTADAS EN LAS MICROCUENCAS DE TRABAJO

#### Microcuenca 1



**Zanjas de infiltración.** Se construyeron en la ladera de exposición oeste de la microcuenca, implementándose más de una zanja formando un conjunto que actuara en forma sistémica. Se realizó un plan de reforestación con eucaliptus (foto superior) y flora nativa (foto inferior).



## Microcuenca 2



**Dique de postes con disipador.** Construido en una cárcava en la ladera oeste de la microcuenca, cuenta con un disipador para impedir la erosión por el impacto del flujo de agua en las temporadas invernales, además se implementaron sacos en los bordes para sostener las paredes anteriores.



**Dique de postes con disipador y acumulador de sedimentos.** Construido en una cárcava al sur del dique anterior en la misma ladera, este dique cuenta con un acumulador de sedimentos en el sector de salida y un disipador en la zona baja.





**Estructura de poste de madera.** Construido en la ladera de exposición norte y cercano al tranque de abastecimiento de agua, tiene como fin la estabilización de la ladera, además de utilizarse en combinación con técnicas de hidrosiembra.



**Dique de estructura gavionada.** Construido con piedras de río y malla metálica, el gavión ha impedido la erosión disminuyendo la energía cinética al flujo de agua. Esto ha permitido el desarrollo de flora en los alrededores de la obra.





**Muro de sacos rellenos.** Se construyó en la ladera de exposición oeste (W) de la microcuenca, Los sacos se rellenan con tierra del mismo lugar y en forma escalonada para mayor resistencia a los procesos erosivos



**Muro de sacos rellenos.** Se construyeron en la zona baja de la ladera respectiva para evitar el arrastre de material de las zonas superiores y además evitar la acumulación de material en el camino para el uso óptimo de este.





**Terraza forestal.** Se implementó en la misma ladera que la terraza de la imagen anterior, pero unos metros más abajo, de tal forma, que las obras actuaran en combinación con otras para evitar la erosión. A diferencia de la anterior, los camellones hacen la obra más visible.



**Tranque.** Inicialmente se construyó como una obra (a modo de embalse) destinada para la acumulación de agua en la zona sur de la microcuenca; aunque, bastante disminuido por las sequías que han afectado a la zona central del país. La flecha superior (a) indica el nivel original de agua y la inferior (b) indica la dirección en la cual se construyó un canal para descargar el superávit de agua.





**Tratamiento lineal de sacos.** Al igual que las obras anteriores, se construyó en zonas erosionadas de la ladera de exposición oeste de la microcuenca. Los sacos se construyeron con malla Rashell (de origen israelí) que dura aproximadamente 15 a 20 años.



**Canal longitudinal de sacos.** Construidos en la zona baja de una ladera de exposición NE, se implementaron para conducir la escorrentía superficial durante las lluvias y evitar el arrastre de material para evitar de esta forma la sedimentación en los cauces.





**Canal longitudinal de sacos.** Construidos en la zona baja de la ladera en que se construyó la obra anterior, tiene por objetivo conducir la escorrentía superficial a orillas del camino durante los episodios pluviométricos para evitar la erosión en la zona baja de la ladera.



**Canales de desviación.** Este sistema de canales fue construido en la ladera de exposición norte en la microcuenca 2.





**Canal de desviación.** Este sistema fue construido en la ladera de exposición sur en la microcuenca 2 en el límite con la microcuenca 4.



**Zanjas de infiltración.** Se construyeron en la zona superior de la ladera oeste de la microcuenca 2; básicamente para permitir la infiltración de agua así como para impedir la erosión por escorrentía. Cuenta con un tabique (a) que separa una zanja de otra y un camellón (b) que impide el desborde de la zanja durante los eventos pluviométricos.



### Microcuenca 3



**Dique de postes con disipador.** A diferencia de la microcuenca 2, en la microcuenca 3 se construyó más de un dique debido a la presencia de numerosas cárcavas, sumado a un alto grado de erosión. En la figura se observa el dique con su respectivo disipador.



**Dique de postes con disipador.** Construido en un sector cercano al dique anterior, se implementó en una zona con un alto grado de erosión y numerosas cárcavas. En dique cuenta con su respectivo disipador.





**Sistema de diques.** La implementación se efectuó cárcavas de la microcuenca 3 en función de la topografía del sector, de tal forma que se construyó más de uno formando un sistema. Las flechas muestran los diques, donde se implementaron para evitar la erosión por escorrentía durante la época invernal.



**Muro de poste de madera.** Construida en la ladera de exposición sur de la microcuenca para impedir la pérdida de suelo y la posterior sedimentación del curso de agua próximo a esta obra.





**Muro de poste de madera en combinación con obra lineal de sacos y dique de poste de madera.** Las obras de restauración hidrológico forestal se combinan en función de las necesidades, topografía, estructura del suelo, etc. La obra lineal de sacos (a) está construida en un sector altamente erosionado y próximo a un cauce, de tal forma que el muro de poste (b) impide el arrastre de material de las zonas superiores y lo que sedimento queda en el dique construido más abajo (c).



**Muro de sacos rellenos.** Implementando en la zona superior de la ladera de exposición norte (N) de la microcuenca 3. Aunque los sacos de tierra ya están deteriorados por el paso del tiempo, permitió el desarrollo de flora exótica en la zona superior de la obra e impidió el arrastre de material a zonas inferiores de la ladera.





**Tratamiento lineal de sacos.** Se implementó en la zona baja de la microcuenca muy cercano a los diques construidos en las cárcavas presentes en el lugar. A diferencia de las obras anteriores construidas en la zona superior de la microcuenca; estos sacos están implementados en conjunto con otras obras formando una estructura sistémica debido al alto grado de erosión.



**Tratamiento lineal de sacos.** Implementados al este de las obras anteriores en la misma ladera, se observa una combinación de esta obra con reforestación, con el fin de evitar la formación de sedimento y la pérdida de suelo de los sectores altos de la microcuenca 3.