



UNIVERSITAT DE
BARCELONA

Origen de la estructura de la caldera Cañas Dulces y su relación con el recurso geotérmico de alta entalpía

Fernando Molina Zúñiga



Aquesta tesi doctoral està subjecta a la llicència [Reconeixement- NoComercial 3.0. Espanya de Creative Commons](#).

Esta tesis doctoral está sujeta a la licencia [Reconocimiento - NoComercial 3.0. España de Creative Commons](#).

This doctoral thesis is licensed under the [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0. Spain License](#).

Origen de la Estructura de la Caldera Cañas Dulces y su Relación con el Recurso Geotérmico de Alta Entalpía



Fernando Molina Zúñiga

Tesis Doctoral

2017



UNIVERSITAT DE
BARCELONA

Facultad de Geología

Programa de Doctorado en Ciencias de la Tierra

Origen de la estructura de la caldera Cañas Dulces y su
relación con el recurso geotérmico de alta entalpía

Fernando Molina Zúñiga

Tesis Doctoral dirigida por Prof. Joan Martí Molist

Tutor: Prof. Joan Manuel Vilaplana

Barcelona, Junio 2017

Origen de la estructura de la caldera Cañas Dulces y su relación con el recurso geotérmico de alta entalpía.

Autor: Fernando Molina Zúñiga

Junio 2017

En la portada: Domos dacíticos, ubicados en los límites estructurales sur y suroeste de la Caldera Cañas Dulces, Cordillera Volcánica de Guanacaste, Costa Rica.

Foto: Fernando Molina Zúñiga.

Dedicatoria

A:

Mi Esposa; Rocío Bravo Quirós

Mi Hijo; Aaron Molina Bravo

Mis Padres; Flora Zúñiga Henly y José Rodrigo Molina Sibaja

Agradecimientos

Es difícil dar las gracias a todas las personas que han hecho posible este proyecto, ya que he compartido con mucha gente durante el desarrollo de esta investigación. Pero sería egoísta de mi parte el no expresar mi gratitud a las personas que más han influido en esta vivencia. Por lo tanto, primero quiero agradecer al Prof. Joan Martí Molist director de tesis, quien me motivó a participar en el programa de doctorado, guio, aconsejó y compartió sus conocimientos, haciendo posible culminar este proceso. En segundo lugar, agradezco al Prof. Joan Manuel Vilaplana, de gran valor ha sido su colaboración y orientación como tutor de tesis. En tercer lugar, al colega y amigo Leyner Chavarría, por su incansable apoyo, discusiones cotidianas y lectura del texto. En cuarto lugar, a Eduardo Vega, Gerardo Aguirre, Sheily Vallejos, Rafael Arce, Antonio Yock y Osvaldo Vallejos, por su ayuda y compartir sus conocimientos. Por último, deseo agradecer al Instituto Costarricense de Electricidad, por el soporte y permitir utilizar su información; así como, al Institut de Ciències de la Terra Jaume Almera, de Barcelona, que sin su apoyo no hubiera sido posible realizar esta tesis doctoral.

Junio 2017

Resumen

El ambiente geotectónico en que se ubica Costa Rica, ha permitido el desarrollo de un arco volcánico activo, contexto geológico que favorece la formación de sistemas hidrotermales con potencial geotérmico; fuente de energía autóctona, sostenible y de bajo impacto para el ambiente, que por sus características se ajusta a las políticas económicas y ambientales del país. No obstante, es bien conocido que el desarrollo de un proyecto geotérmico implica un alto riesgo económico, lo que se ha tornado en un factor determinante a nivel mundial, que limita un mayor provecho de este recurso para generar electricidad. Sin embargo, en Costa Rica la energía geotérmica es estratégicamente importante, pues se utiliza en la base de la matriz eléctrica, por lo que el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) tiene programado iniciar en el primer semestre del 2018 el desarrollo del campo geotérmico Borinquen, ubicado en la falda oeste del volcán Rincón de la Vieja, Guanacaste, Costa Rica. Proyecto que dio origen a esta tesis doctoral, cuyo principal objetivo es mejorar la comprensión del sistema hidrotermal relacionado con la zona geotérmica Borinquen, para mitigar el riesgo asociado al desarrollo en busca de lograr una explotación sostenible. Para lo cual, la investigación se enfoca en tres aspectos principales:

El trabajo inicia con los estudios de exploración a nivel regional, con el fin de plantear un modelo volcanológico estructural del área de estudio. El cual se realiza con base en datos obtenidos por el ICE desde 1974, conjuntamente con nuevos trabajos de teledetección, geología de campo, descripciones exhaustivas de perforaciones, dataciones radiométricas, reinterpretación de datos gravimétricos y análisis de sismos naturales e inducidos; lo que permite describir la estratigrafía, estructura y evolución volcánica de la zona de interés.

El estudio continúa con investigaciones más detalladas en el flanco suroeste del volcán Rincón de la Vieja, en busca de corroborar la existencia de un sistema hidrotermal económicamente explotable y plantear un modelo conceptual de la zona geotérmica Borinquen. Se utiliza como base el modelo volcanológico estructural, se analiza e integra la distribución de la: litoestratigrafía, mineralogía de alteración, resistiva aparente, gradiente térmico, así como composición geoquímica e isotópica de los fluidos provenientes de agua meteórica, manifestaciones hidrotermales y pozos. Información con la que se determina la ubicación de: fuente de calor, reservorio, capa sello, zona de recarga, pasos preferenciales y dirección del fluido. En la tercera parte del estudio, se diseña una estrategia inicial de desarrollo viable para la zona Geotérmica Borinquen. Se integra y analiza la información geológica, geofísica, gradiente térmico y el modelo conceptual del sistema hidrotermal, para generar modelos de aptitud con los que se zonifica el recurso geotérmico de alta entalpía, e identifican las áreas aptas para ubicar: las zonas de producción y reinyección; así como, las plazoletas de

perforación. Además, por medio del método volumétrico “USGS Heat in Place” y el simulador Montecarlo, se evalúa el potencial geotérmico y estima la energía eléctrica que puede generar el área destinada como zona de producción, con un fundamento estadístico y probabilístico. Con esta información se calcula el número de pozos necesarios para iniciar la producción de 50 MWe y plantear una estrategia inicial de desarrollo viable, que busca fundar las bases para lograr la explotación sostenible del Campo Geotérmico Borinquen.

Summary

The Costa Rican Electricity Utility (ICE) has programmed to start the first semester of 2018 with the development of the Borinquen Geothermal Field, located on the western flank of the the Rincón de la Vieja volcano, Guanacaste, Costa Rica. The mentioned Project has given rise to this Doctoral Thesis, which has the main objective of bettering the understanding of the hydrothermal system related with the Borinquen geothermal zone, in order to mitigate the risk associated with development, in the search of achisustainable exploitation. That is why this investigation focuses on three main aspects:

Work begins with regional exploration studies, with the aim of proposing a vulcanologic-structural model for the study area. This is done based on the data obtained by ICE since 1974, along with new studies of teledetection, field geology, exhaustive borehole descriptions, radiometric datings, reinterpretación of gravimetric data as well as the analysis of natural and induced seismic activity; which have permitted to discover the stratigraphy, structure and volcanic evolution in the area of interest.

Work continues with more detailed investigations on the southwest flank of the Rincón de la Vieja volcano, in search of confirming the existence of an economically exploitable hydrothermal system and propose a conceptual model for the Borinquen geothermal zone. Using the vulcanologic-structural model as a base, lithology, alteration mineralogy, apparent resistivity, geothermal gradient, the geochemical and isotopic composition of the meteoric waters, hydrothermal manifestations and boreholes are analyzed and integrated. This information is used to determine the location of: the heat source, the reservoir, the cap rock, the recharge zone and preferential flow directions. In the third part of the study, an initial development strategy, viable for the Borinquen geothermal zone, is designed. Geologic, geophysical and thermal gradient information is analyzed and integrated with the conceptual

hydrothermal system model to locate: production and reinjection zones; as well as well pads for boreholes. Also, by of the volumetric method “USGS Heat in Place” and a Montecarlo simulator, the geothermal potential is evaluated and an estimate of the electric energy that can be generated is made for the production zone, based on statistics and probability. With this information the number of boreholes is calculated to start a production of 50 MWe and propose an initial strategy for viable development, which searches to form the base for achieving a sustainable exploitation of the Borinquen Geothermal Field.

Tabla de contenido

Resumen	v
Summary	vi
Lista de Figuras.....	x
Lista de Tablas.....	xii
1 Introducción	1
1.1 Motivación.....	1
1.2 Objetivos	3
1.3 Estructura de la tesis	5
2 Estado del Arte	6
2.1 Energía geotérmica	6
2.1.1 Clasificación de los sistemas geotérmicos	7
2.2 Estudios geocientíficos de exploración de recursos geotérmicos de alta entalpía	8
2.3 Historia del desarrollo de la energía geotérmica en Costa Rica	10
2.3.1 Campo Geotérmico Miravalles	11
2.3.2 Campo Geotérmico Las Pailas	11
2.3.3 Zona Geotérmica Borinquen.....	12
3 Resultados.....	13
3.1 Modelo volcanológico estructural del área de estudio	13
3.1.1 Estratigrafía	13
3.1.1.1 Unidad Pre-Formación Liberia.....	14
3.1.1.2 Formación Liberia.....	18
3.1.1.3 Post- Formación Liberia	19
3.1.2 Geología Estructural	20
3.1.2.1 Sensores Remotos.....	20
3.1.2.2 Datos de campo	23
3.1.2.3 Gravimetría.....	25
3.1.2.4 Localización de sismos.....	26
3.2 El sistema geotérmico Borinquen	29
3.2.1 Mineralogía de alteración	29
3.2.1.1 Zona de esmectita.....	30
3.2.1.2 Zona de transición.....	30
3.2.1.3 Zona de Illita	31
3.2.2 Zonas permeables.....	33
3.2.3 Magnetotelúrica.....	34

3.2.4	<i>Manifestaciones Termales</i>	36
3.2.5	<i>Hidrogeoquímica</i>	37
3.2.6	<i>Gradiente térmico</i>	41
3.2.7	<i>Isótopos estables Deuterio y Oxígeno 18 (δD y $\delta^{18}O$)</i>	43
3.3	Estrategia inicial de desarrollo para la zona geotérmica Borinquen	47
3.3.1	<i>Selección de áreas aptas para ubicar plataformas de perforación</i>	49
3.3.1.1	Pendientes	49
3.3.1.2	Red hídrica.....	49
3.3.1.3	Infraestructura existente	49
3.3.1.4	Plataformas existentes	50
3.3.2	<i>Zonificación del recurso geotérmico de alta entalpía</i>	51
3.3.2.1	Resistividad	52
3.3.2.2	Gradiente térmico	53
3.3.2.3	Estructuras.....	54
3.3.2.4	Resultados del modelo de zonificación del recurso geotérmico.....	55
3.3.3	<i>Evaluación del potencial energético</i>	58
3.3.4	<i>Características de termo-hidráulicas los pozos geotérmicos</i>	63
4	Discusión	64
4.1	Evolución volcano-tectónica de la del área de estudio	64
4.1.1	<i>Estratigrafía</i>	65
4.1.2	<i>Límites estructurales de la Caldera</i>	65
4.1.3	<i>Formación de la caldera Cañas Dulces</i>	69
4.2	Sistema hidrotermal zona geotérmica Borinquen	71
4.2.1	<i>Modelo conceptual</i>	73
4.3	Estrategia inicial de desarrollo	76
4.3.1	<i>Escenario 1: utilizando los pozos PGB 01, PGB 02 y PGB 05</i>	78
4.3.2	<i>Escenario 2: utilizando los pozos PGB 02 y PGB 05</i>	78
4.3.3	<i>Selección de plazoletas y pozos</i>	78
5	Conclusiones	80
5.1	Conclusiones.....	80
	Referencias	84
	Anexos	89
A	Stratigraphy and structure of the Cañas Dulces caldera (Costa Rica)	90
B	The Borinquen geothermal system (Cañas Dulces caldera, Costa Rica)	108
C	Proposal of an initial development strategy for the Borinquen geothermal zone (Cañas Dulces, Costa Rica)	125

Lista de Figuras

Figura 1.1: Marco volcano-tectónico de Costa Rica y la localización del área de estudio, con los rasgos volcánicos más importantes del NW de Costa Rica.	4
Figura 3.1: Mapa geológico simplificado del área de estudio	15
Figura 3.2: Columna estratigráfica general con edades radiométricas del área de estudio, basada en correlación de pozos de la zona geotérmica Borinquen, campo geotérmico Las Pailas y datos de afloramientos..	16
Figura 3.3: Características morfológicas más relevantes a nivel regional de los complejos volcánicos Rincón de la Vieja – Santa María, Miravalles y zonas adyacentes..	22
Figura 3.4: Principales lineamientos morfológicos, datos de campo y distribución espacial de manifestaciones termales.	24
Figura 3.5: Mapa de la anomalía gravimétrica de Bouguer del área de estudio reducida a una densidad de 2.3 g/cm ³	26
Figura 3.6: Distribución espacial de eventos sísmicos (sismicidad natural e inducida por la reinyección de fluidos geotérmicos).	28
Figura 3.7: (a) Zona geotérmica Borinquen con la distribución de los pozos profundos, estructuras geológicas, línea de perfil y pozos del campo geotérmico Las Pailas. (b) Perfil entre los pozos PGB 03, PGB 02 y PGB 05, con la distribución de las zonas de alteración mineralógica, isoterma de 220 °C y la isolínea de aparición de la epidota.	32
Figura 3.8: Columna litológica del PGB 02, distribución de los minerales de alteración, zonas de alteración y perfil de temperatura estática.	33
Figura 3.9: Distribución de la resistividad a 500 m y 1350 m de profundidad y lineamientos resistivos.	35
Figura 3.10: distribución de las principales manifestaciones termales.	37
Figura 3.11: (a) diagrama de Piper en el que se utiliza la concentración relativa de los aniones SO ₄ , Cl y HCO ₃ , para clasificar las aguas. (b) diagrama Na-K-Mg con la línea de equilibrio total de Giggemback (1988).	38
Figura 3.12: Mapa de distribución de gradiente térmico, manifestaciones termales y lineamientos térmicos.	42
Figura 3.13: (a) distribución del Deuterio con respecto a la altura en la vertiente Pacífica, entre las cotas 55 y 1790 m s.n.m. (b) Distribución espacial de las muestras de agua meteórica, nacientes termales, pozos geotérmicos y estación Monte Galán.	45
Figura 3.14: Correlación de $\delta^{18}\text{O}$ y δD de muestras de pozos geotérmicos de Las Pailas y Borinquen.	46

Figura 3.15: Diagrama de flujo de la estrategia inicial de desarrollo planteado para la zona geotérmica Borinquen.....	48
Figura 3.16: Capas temáticas reclasificadas de forma binaria: a) áreas con pendientes menores o igual a 15. b) área de protección de 100 m alrededor de ambas márgenes de los ríos y quebradas. c) área buffer de 400 m alrededor de la infraestructura existente. d) área buffer de 900 m alrededores las plataforma de perforación existentes.	50
Figura 3.17: Mapa de distribución de áreas aptas para ubicar plataformas de perforación de acuerdo a criterios: topográficos, logísticos y ambientales.	51
Figura 3.18: Distribución de la resistividad con respecto a la profundidad: a) capa a 500 m de profundidad. b) capa a 1100 m de profundidad. c) capa a 1750 m de profundidad.	53
Figura 3.19: Capas temáticas reclasificadas utilizadas en la zonificación del recurso geotérmico: a) resistividad, b) gradiente térmico. c) estructuras.....	55
Figura 3.20: Modelo de zonificación del recurso geotérmico de alta entalpía. a) distribución de las áreas de acuerdo al potencial del recurso geotérmico de alta entalpía. b) Delimitación de tres escenarios (máximo, mínimo y más probable) del área que presenta características para desarrollar la zona de producción.	57
Figura 3.21: Distribución de las principales áreas de acuerdo a su aptitud para el desarrollo del recurso geotérmico de alta entalpía.	58
Figura 3.22: Características geológicas y termohidráulicas del Pozo Geotérmico Borinquen 05.....	62
Figura 4.1: Mapa geológico simplificado y límites estructurales inferidos de la caldera Cañas Dulces. CGP – campo geotérmico Las Pailas, ZGB – zona geotérmica Borinquen.	66
Figura 4.2: (a) Perfil geológico desde PBr 28 al Río Liberia. (b) Perfil desde el Río Ahogados hasta la F3.....	67
Figura 4.3: Esquema de la evolución volcano-tectónica del área de estudio y formación de la caldera de Cañas Dulces. 1- domo Góngora Viejo, 2- domo San Roque, 3- domo San Vicente, 4- domo Fortuna, 5- domo Hornillas, 6- domo Cañas Dulces, 7- domo Góngora Joven.	70
Figura 4.4: Modelo conceptual del sistema geotérmico de Borinquen.....	75
Figura 4.5: Estrategia inicial de desarrollo para la zona geotérmica de Borinquen.....	79

Lista de Tablas

Tabla 3.1: Edades radiométricas de rocas del área de estudio.....	17
Tabla 3.2: Espesores de la Formación Liberia medidos en las perforaciones de la zona geotérmica Borinquen y el campo geotérmico Las Pailas.....	18
Tabla 3.3: Distribución de las zonas de alteración y espesor por pozo perforado con la temperatura asociada.....	31
Tabla 3.4: Análisis químicos de manifestaciones hidrotermales y pozos geotérmicos de Borinquen y clasificación del tipo de agua con base en la concentración de los aniones SO ₄ , Cl y HCO ₃	40
Tabla 3.5: Datos de las perforaciones utilizadas para determinar la distribución del gradiente térmico en la zona geotérmica Borinquen.....	41
Tabla 3.6: Datos de isotopos estables $\delta^{18}\text{O}$ y δD de los pozos geotérmicos (Borinquen y Las Pailas), nacies de agua meteórica y termal, y de la estación meteorológica Monte Galán.....	44
Tabla 3.7: Valores de aptitud y peso asignados a las capas temáticas del escenario de zonificación del recurso geotérmico seleccionado.....	54
Tabla 3.8: Valores utilizados en el cálculo del potencial eléctrico por medio del método USGS Heat in Place y el simulador Monte Carlo.....	60
Tabla 3.9: Características termohidráulicas de los pozos de Borinquen.....	63

Introducción

1.1 Motivación

Costa Rica posee una extensión de 51 100 km². Se ha dado a conocer en el mundo por sus políticas de protección al medio ambiente; y generación de electricidad con fuentes limpias. Una cuarta parte (25,1 %) del territorio nacional está bajo algún régimen de área silvestre protegida, siendo uno de sus mayores atractivos turísticos y generación de divisas. No obstante, las políticas aplicadas a las áreas protegidas limitan el uso de los recursos naturales y principales fuentes de energía necesarias para el desarrollo del país. Aun así, la cobertura eléctrica en Costa Rica actualmente alcanza el 99,5 % del territorio nacional, con una matriz que utiliza cinco fuentes de energía limpia. El sistema está adaptado para complementar y compensar con plantas térmicas que se emplean al final de la estación seca, cuando disminuye el caudal de los ríos y la intensidad del viento. En el 2015, el consumo se abasteció con: 75 % hídrica, 13 % geotérmica, 10 % eólica, 1 % térmico y 1 % biomasa y solar. Considerando que la matriz energética debe ser robusta y confiable se utiliza la energía geotérmica en la base, pues no depende de fenómenos climáticos, es estable las 24 horas del día, los 365 días del año (con excepción de periodos de mantenimiento), lo que se refleja en factores de planta superiores a un 90 %. Aun con los logros alcanzados al día de hoy en el tema de generación de electricidad, se debe enfrentar el reto de erradicar el uso de fuentes fósiles y maximizar el beneficio de los recursos renovables, de explotación sostenible, que causen un bajo impacto al ambiente, máxime que el consumo de energía aumenta año con año y se vislumbra un país afectado por la disminución de lluvias debido al calentamiento global.

Frente a este escenario, es necesario ser prudente por la seguridad del abastecimiento energético a mediano plazo. Bajo esta visión, el ICE ha trabajado en la diversificación de la matriz energética, y desde 1994 ha aprovechado la energía geotérmica que se deriva del

proceso de subducción que se lleva a cabo frente a la costa Pacífica de Centroamérica, donde la placa de Cocos al deslizarse por debajo de la placa Caribe da origen a actividad tectónica y volcánica. Lo que provoca en el continente, paralelo a la Fosa Mesoamericana, el levantamiento del arco magmático interno (Fig. 1.1), como consecuencia del magma que se origina en la zona del manto astenosférico. Este ambiente geológico, genera un contexto de gran potencial geotérmico, al combinarse diferentes elementos necesarios para el desarrollo de sistemas hidrotermales en áreas volcánicas activas. El magma induce anomalías térmicas, provocadas por el emplazamiento de diques y/o plutones, constituyendo la fuente de calor. Las rocas con alta densidad de fracturación relacionada a actividad tectónica (Curewitz & Karson, 1997) y descompresión por enfriamiento (Norton, 1984), son ideales para almacenar el fluido, medio por el cual se transporta la energía, que puede ser agua de origen: meteórica (Giggenbach, 1992; Curewitz & Karson, 1997), marina (Mottl, 1983), magmática (Giggenbach, 1992), o mezclas entre dos o más de ellas.

Considerando que la explotación de recurso geotérmico de alta entalpía para generar electricidad es un proceso geológico-industrial, para alcanzar el éxito, es esencial ejecutar investigaciones geocientíficas de forma metódica y diligente para adquirir una mayor comprensión de los eventos volcano-tectónicos e hidrogeológicos acaecidos en la región, que ayuden a dilucidar los sistemas hidrotermales, a tal grado que permitan seleccionar las áreas prospecto y ubicar los objetivos de perforación con mayor eficiencia, tarea que se basa en información y conocimiento netamente geocientífico. Pues, es bien conocido que el desarrollo de un campo geotérmico tiene implícito un alto riesgo económico, ya que, en las primeras etapas existe un elevado grado de incertidumbre de la existencia del recurso geotérmico en la cantidad necesaria que garantice la vida útil del reservorio para que el proyecto sea económicamente viable, lo que obliga a perforar para corroborar su presencia; proceso que de acuerdo a Gehringer y Loksha (2012), requiere alrededor del 50 % de la inversión total del proyecto; ambos factores (incertidumbre y costo) se han tornado en el principal obstáculo que impide un mayor uso de esta energía para generar electricidad a nivel mundial.

Aunque las primeras investigaciones de reconocimiento en la vertiente Pacífica del volcán Rincón de la Vieja, sector donde se ubica el área de estudio (Fig. 1.1), se remonta a 1974, en las primeras dos décadas la cantidad de información que se generó fue escasa. Al ser asignado en 1994 como geólogo de exploración e investigación del Centro de Servicios de Recurso Geotérmico, del ICE, para continuar con los estudios en los alrededores del volcán Rincón de la Vieja, me permitió ejecutar y ser parte de la mayor cantidad de investigaciones que se han realizado en ese sector, así como integrar el grupo que seleccionó la zona geotérmica Borinquen para su desarrollo. Conscientes del riesgo que esto implica, pero a su vez, conocedores que el recurso geotérmico de alta entalpía es una fuente de energía que se ajusta

a las políticas ambientales y económicas del país por ser: autóctona, sostenible, limpia y económica; el ICE después de 44 años de haber iniciado la exploración en los alrededores del volcán Rincón de la Vieja, en el primer semestre del 2018, dará inicio al desarrollo de la primera etapa del campo Geotérmico Borinquen, que busca el recurso geotérmico para instalar una planta geotermoeléctrica de 50 MWe. Proyecto que ha sido un extraordinario caso de estudio y dio paso al desarrollo de la presente investigación.

1.2 Objetivos

Esta tesis doctoral está dedicada a mejorar la comprensión del sistema hidrotermal relacionado con la zona geotérmica Borinquen, por medio de la ejecución de una secuencia lógica de estudios geocientíficos, que permitan vincular y sintetizar metódicamente la información desde la etapa de exploración hasta el inicio del desarrollo, con el fin de incrementar la probabilidad de éxito y disminuir el costo del desarrollo del futuro campo geotérmico Borinquen, al identificar las áreas aptas para utilizarlas como polos de producción y reinyección, con el propósito de ser más efectivos al ubicar los blancos de perforación. Aunque el trabajo se realiza para un caso específico, como se muestra en el transcurso de esta investigación, la metodología utilizada aquí se pueda aplicar en otras áreas de interés geotérmico.

Para cubrir los diferentes aspectos que engloba este trabajo, el objetivo principal se ha dividido en tres objetivos menores. El primero está orientado a plantear un modelo volcanológico estructural, que vislumbre la magnitud de los eventos volcano-tectónicos acaecidos durante la evolución geológica del área de estudio. El segundo objetivo está dirigido a corroborar la existencia de un sistema geotérmico de alta entalpía comercialmente explotable (ubicado a profundidades menor o igual a 3 km de profundidad, y fluidos geotérmicos con temperatura mayor igual a 220 °C), para generar energía eléctrica y plantear un modelo conceptual que sirva de guía durante los sucesivos estudios de exploración y desarrollo. El tercer objetivo se enfoca en plantear una estrategia inicial de desarrollo para la zona geotérmica Borinquen, con el fin de lograr una explotación del recurso geotérmico sostenible, que prolongue la vida útil del yacimiento, para obtener la mayor rentabilidad económica posible.

Por consiguiente, con el fin de incrementar el éxito del desarrollo de la geotermia en Costa Rica, esta investigación busca aportar un insumo más, para simplificar el trabajo de los tomadores de decisiones, facilitando al ICE afrontar uno de sus mayores retos de la actualidad, incrementar la capacidad de generación de electricidad utilizando energía limpia y sostenible, de forma que no se vea afectado el progreso del país, ni la calidad de vida de los costarricenses.

1. Introducción

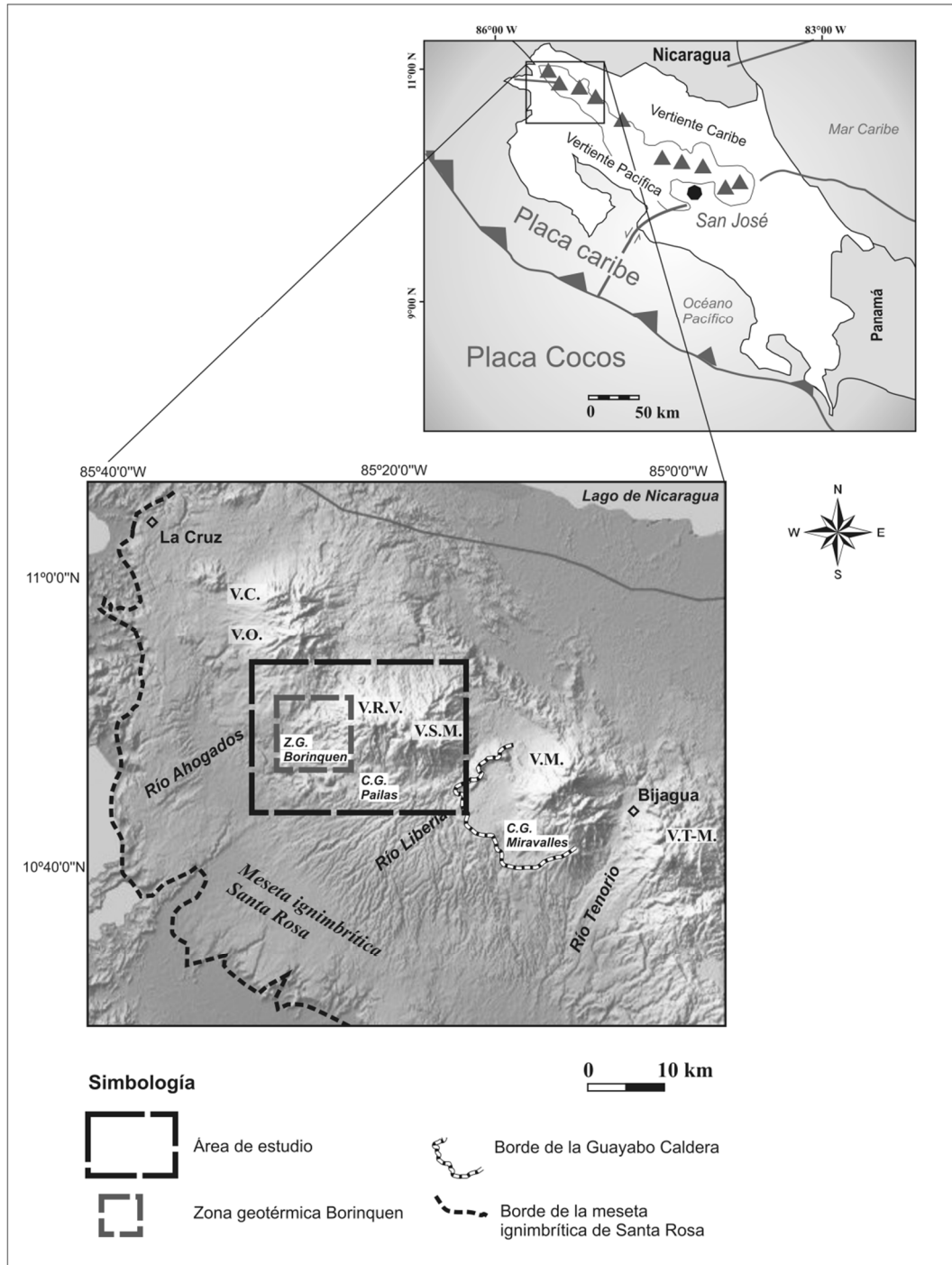


Figura 1.1: Marco volcánico-tectónico de Costa Rica donde se muestran las placas Cocos y Caribe, la fosa Mesoamericana, el arco magmático interno y la localización del área de estudio, con los rasgos volcánicos más importantes del NW de Costa Rica. V.C. – Volcán Cacao, V.O. – Volcán Orosí, V.R.V. – Volcán Rincón de la Vieja, V.S.M. – Volcán Santa María, V.M. – Volcán Miravalles, V.T.M. – Volcán Tenorio-Montezuma, Z.G. Borinquen. - Zona Geotérmica Borinquen, C.G. Pailas – Campo Geotérmico Las Pailas, C.G. Miravalles – Campo Geotérmico Miravalles y la Meseta Ignimbrítica Santa Rosa.

1.3 Estructura de la tesis

De acuerdo a la normativa de la Facultad de Geología de la Universidad de Barcelona, esta tesis de doctorado se presenta con el formato de compendio de publicaciones. Durante la realización de la investigación, conforme se adquirió información y se fue logrando los objetivos, los resultados se sintetizaron en tres publicaciones tituladas:

- Stratigraphy and structure of the Cañas Dulces caldera (Costa Rica).
- The Borinquen geothermal system (Cañas Dulces, Costa Rica).
- Proposal of an initial development strategy for the Borinquen geothermal zone (Cañas Dulces, Costa Rica)".

Con base en las publicaciones, la tesis se organizó en cinco capítulos: Introducción, donde se expone la motivación y los objetivos, haciendo énfasis en la importancia que tiene el desarrollo de este tipo de energía para Costa Rica. El segundo capítulo está dedicado al estado del arte de la geotermia; se describen conceptos generales, así como los estudios geocientíficos relacionados con la exploración del recurso geotérmico de alta entalpía; además, se brinda una breve historia del desarrollo de la geotermia en Costa Rica. En el tercer capítulo se describe los principales resultados obtenidos durante el desarrollo de la investigación. En el cuarto capítulo se integra y sintetiza la discusión de los tres artículos, en él se presenta el modelo volcano-tectónico del área de estudio, el modelo conceptual del sistema hidrotermal y la estrategia inicial de desarrollo para la zona Geotérmica Borinquen. Finalmente, en el capítulo cinco se resumen las conclusiones. Los artículos científicos publicados o en revisión se incluyen como Apéndices A, B y C.

Estado del Arte

2.1 Energía geotérmica

El gradiente térmico medio de la corteza continental se estima en $30\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ (Prol, 1996; Stober, 2014; Zharkov, 1985), este incremento de la temperatura con respecto a la profundidad proviene del calor emanado por el núcleo de la tierra almacenado durante su formación y de procesos de desintegración de elementos radioactivos, principalmente: Uranio, Torio y Potasio, que se encuentra en concentraciones significativas en rocas graníticas, que forman la parte superior de la corteza continental (Prol, 1996; Stober, 2014). Esta energía alimenta la geodinámica, elemento fundamental en la Deriva Continental propuesta por Alfred Wegener desde 1912 y la teoría Tectónica de Placas; responsable de los fenómenos geológicos que observamos en la superficie, que hace posible la actividad volcánica, sísmica y formación de cordilleras, entre otros.

De acuerdo a la tectónica de placas, la litosfera está dividida en placas (cuerpos rígidos) que se localizan sobre la astenosfera (que se comporta como un fluido viscoso), permitiendo su desplazamiento ayudadas por la energía térmica del interior de la tierra, y la energía potencial gravitatoria. Esta dinámica entre placas, al desplazarse unas respecto a las otras generan en sus límites interacción, ya sea convergiendo, divergiendo o simplemente deslizándose entre ellas. Estas fronteras son áreas en el planeta donde se favorece el transporte de flujo de calor desde el interior hasta zonas de descarga, en el cual intervienen una serie de procesos que redistribuyen energía y masa en respuesta a la circulación de fluidos formando sistemas geotérmicos. Cuando el fluido es magma, se forman los sistemas volcánicos que se manifiestan como cordilleras volcánicas bien definidas a lo largo de las dorsales y zonas de subducción; o bien, si el fluido es agua caliente o salmuera (agua con alta concentración de sales), vapor y gases, constituyen sistemas hidrotermales (Norton 1984, Giggenbach, 1988). En este trabajo, al hablar de sistemas geotérmicos se refiere a sistemas hidrotermales ligados a vulcanismo reciente (menor a 1 millón de años),

compuestos por una fuente de calor (magma), fluido constituido principalmente por agua que transporta el calor, un reservorio (roca porosa y fracturada) en que se almacena el fluido.

En términos generales, se denomina energía geotérmica a la energía térmica almacenada bajo la superficie terrestre (Prol, 1996; Mendrinós et al., 2008). Considerando toda la superficie de la Tierra, se calcula que la energía geotérmica total que llega desde el interior es de 4.2×10^{12} J (Prol, 1996). Debido a la gran cantidad de energía contenida en el planeta, esta podría cubrir todas las necesidades de la población mundial por miles de años, siendo inagotable en términos de vida humana, por lo que se considera una energía renovable. Pero no toda puede ser utilizada, pues solamente una fracción del calor almacenado en la matriz de la roca y en el fluido presente en los poros y fracturas, puede ser extraído y aprovechado en condiciones técnicas y económicas, lo que se denomina recurso geotérmico (Prol, 1996).

2.1.1 Clasificación de los sistemas geotérmicos

Aunque la energía geotérmica es categorizada como una energía “nueva”, la humanidad ha utilizado las nacientes de agua caliente desde los albores de la civilización en diversas partes del mundo (romanos, griegos, aztecas, japoneses, turcos, maoríes, etc.), con fines recreativos y medicinales (Prol, 1996; Fridleifsson, 2001). Fue en 1904 cuando el Príncipe Piero Ginori Conti inicia la generación de electricidad con vapor geotérmico en Larderello, Toscana, Italia. No obstante, comercialmente la producción de electricidad inició en Larderello, en 1913 (Fridleifsson, 2001), atrayendo la atención mundial hacia este recurso, pues es una forma de diversificar la matriz eléctrica con una fuente de energía limpia, que ha demostrado ser económicamente factible. La energía geotérmica ha sido producida comercialmente por cerca de 100 años y por 5 décadas en la escala de cientos de MWe por medio de generación eléctrica y usos directos. Gracias al avance de la tecnología es posible aprovechar los recursos geotérmicos en un rango amplio de temperaturas, de forma que se extrae el contenido energético de los fluidos geotérmicos con mayor eficiencia, lo que ha permitido que su utilización haya incrementado rápidamente en las últimas 4 décadas.

El grado de aprovechamiento de la energía geotérmica depende de propiedades como: temperatura, entalpía y estado físico del fluido en el reservorio. Estas características se utilizan para clasificar los sistemas hidrotermales, que además son la base para definir el uso, y por ende, la inversión a realizar. El criterio más común aplicado para clasificar los sistemas geotérmicos se basa en la entalpía del fluido o cantidad de energía que un sistema puede intercambiar con su entorno y está directamente ligado con la temperatura (que define el estado termodinámico del cuerpo); al punto que, a mayor temperatura, mayor calidad de energía térmica y posibilidad de aprovechamiento. En la literatura existen diversas propuestas de clasificaciones de los recursos geotérmicos con base en la entalpía (Muffler et al., 1978;

Hochstein, 1990; Benderitter et al., 1990, Nicholson, 1993; Axelsson et al., 2000); así como con base en la temperatura (Bodvarsson, 1964; Bundschuh and Chandrasekharam, 2002). Una de las clasificaciones más utilizadas es: baja entalpía $T \leq 100$ °C, media entalpía $100 < T \leq 150$ °C y alta entalpía $T > 150$ °C.

Los sistemas geotérmicos también se clasifican con base en el estado físico del fluido que controla la presión del reservorio en estado no perturbado (Kjaran & Eliasson, 1983). Los sistemas de líquido dominante pueden contener solamente agua líquida o mezclada con vapor, predominando la fase líquida. Los sistemas vapor dominante contienen líquido inmóvil o ligeramente móvil, el vapor representa más del 50 % en volumen, aunque en masa el porcentaje es mucho menor, debido a la baja densidad del vapor. El vapor se localiza en las fracturas y fallas, siendo la fase móvil dentro del reservorio; mientras que el líquido se encuentra en los poros adherido a la matriz de la roca, actuando como una reserva importante de masa que al evaporarse por transferencia de calor de la roca, contribuye a la producción de vapor.

Por el modo de utilizar la energía geotérmica, se divide en usos directos y generación de electricidad. Cuando la temperatura del yacimiento no es suficiente para producir de forma eficiente energía eléctrica ($\sim T \leq 100$ °C), se puede hacer un aprovechamiento directo o, a través de bomba de calor geotérmica (calefacción y refrigeración). Cuando se trata de recursos de temperaturas muy bajas ($T \leq 25$ °C), las posibilidades de uso están en la climatización y obtención de agua caliente. Actualmente los recursos geotérmicos se emplean de forma directa para: calefacción, enfriamiento, horticultura, acuicultura, ganadería, turismo, industria y salud, entre otros (Prol, 1996, Fridleifsson, 2001). Cuando se trata de fluidos con temperaturas entre 100 y 150 °C, se adopta tecnología de ciclo binario para generar electricidad, se basa en transferir el calor del recurso geotérmico a un fluido de trabajo secundario a través de un intercambiador de calor, para convertirlo en vapor que activa la turbina y genera electricidad. El vapor, luego de haber movido las turbinas, se condensa y vuelve a ser reutilizado (ciclo cerrado). Si la temperatura es sobre 150 °C, es apropiado para la producción de electricidad utilizando técnicas convencionales, donde el vapor del agua se conduce directamente a la turbina.

2.2 Estudios geocientíficos de exploración de recursos geotérmicos de alta entalpía

Considerando que la geotermia se fundamenta en aprovechar el calor almacenado en el subsuelo, la evaluación de los recursos geotérmicos ha sido una de los mayores retos desde los primeros días del desarrollo industrial de esta ciencia, y conforme se incrementa su uso, las

áreas aptas para futuros desarrollos son menos evidentes, lo que obliga a perfeccionar los métodos y herramientas de investigación.

Usualmente los estudios de exploración geotérmica inician a nivel regional en áreas que pueden superar los 1000 km² (Goldstein, 1988; Wright et al., 1989). Durante cada etapa, el área de interés se va reduciendo al seleccionar zonas prospecto, y las investigaciones geocientíficas se tornan de mayor detalle y costo, con el fin de localizar evidencia desde la superficie que indique la existencia y localización de reservorios geotérmicos a profundidades económicamente explotables. Para lograr este objetivo, es necesario desarrollar estudios: geológicos, geoquímicos y geofísicos (Arnórsson, 2000; Medrinos et al, 2008; Molina, 2009), para obtener indicios de la presencia de los elementos básicos que evidencian la existencia de recurso geotérmico (agua, fuente de calor, roca permeable y capa sello); información que se debe integrar y analizar para plantear el modelo conceptual del sistema hidrotermal, necesario para realizar la zonificación y evaluación del recurso geotérmico, base para proponer una estrategia inicial de desarrollo, con el fin de incrementar la probabilidad de éxito.

Durante la prospección geotérmica, los estudios de sensores remotos y geológicos son los primeros que se llevan a cabo con el fin de obtener un modelo geológico estructural. Se hace énfasis en comprender los eventos volcano-tectónicos que han intervenido en la configuración de la geología del lugar, se da importancia a las rocas ígneas jóvenes (distribución espacial, espesor, composición, edad y alteración hidrotermal), que pueden estar asociados a una fuente de calor y/o constituir un reservorio; así como: distribución, naturaleza y orientación de fallas, fracturas, estratos permeables y manifestaciones termales. Estos estudios proveen información base necesaria para interpretar los resultados obtenidos por medio de las investigaciones geoquímicas y geofísicas, en busca de identificar y recomendar las áreas en las que se debe continuar investigando.

Los estudios geoquímicos se desarrollan principalmente en las áreas de alteración hidrotermal, pues son fuentes de datos que ayudan a dilucidar procesos hidrogeológicos que se llevan a cabo en extensas áreas por donde circulan los fluidos (Molina, 2009). En estos sectores se caracteriza: química, isotópica y térmicamente los fluidos; lo que aporta información del origen, composición, temperatura y dirección de movimiento del fluido que constituye el reservorio geotérmico; así como, la fuente de calor (Arnórsson, 2000; Noorollahi et al., 2007, Molina y Martí, 2016).

Los estudios geofísicos buscan obtener algunos parámetros físicos de las formaciones y estructuras geológicas de manera indirecta (profundidad, tamaño, forma, etc.). Mediante estos métodos se logra detectar: cuerpos intrusivos que de acuerdo a sus dimensiones y edad pueden ser fuentes de calor, formaciones geológicas que podrían constituir un reservorio geotérmico,

fallas que actúan como paso de fluidos geotérmicos, o, por el contrario, barreras hidrogeológicas, zonas de alteración hidrotermal (roca alterada) que ejercen la función de capa sello (acuicludo). En resumen, los métodos geofísicos permiten definir áreas con mayor probabilidad de contener recurso geotérmico.

La determinación del gradiente geotérmico se realiza por medio de mediciones directas en perforaciones, permite cuantificar la relación de cambio de la temperatura con la profundidad, la cual está ligada a la energía calórica almacenada en la roca y disposición del fluido que sirve como medio de transporte del calor. El análisis de esta información permite deducir: la distribución de la anomalía térmica, dirección del flujo, zonas de ascenso, así como áreas preferenciales de paso de fluidos asociados a estructuras o roca permeable (Molina, 2009).

Al término de esta etapa de exploración, se elabora el primer modelo conceptual del sistema geotérmico a partir de la integración y análisis de la información obtenida de los estudios geocientíficos, que se sintetiza en un esquema donde la distribución de los elementos hidrogeológicos y geotérmicos debe ser compatibles y mostrar: fuente de calor, distribución de la anomalía térmica, estructuras geológicas que controlan el sistema hidrotermal, áreas de recarga, ascenso y dirección de fluidos, roca que constituye el reservorio, así como la capa sello. El modelo conceptual debe ser lo más preciso posible, ya que en conjunto con la información adquirida hasta esta etapa es base para diseñar la estrategia inicial de desarrollo que incluye: identificar áreas aptas para ubicar las plataformas de perforación, zonificar el recurso geotérmico de alta entalpía, estimar el potencial de energía eléctrica que se puede producir del sistema, cuantificar y ubicar el número de pozos necesarios para iniciar la generación de electricidad.

2.3 Historia del desarrollo de la energía geotérmica en Costa Rica

En 1963 un grupo de expertos de las Naciones Unidas, por medio de una campaña de reconocimiento, identifican diferentes áreas de interés geotérmico, (Bodvarson y Bailey, 1963), ubicando los sectores más prometedores en la vertiente Pacífica de la Cordillera Volcánica de Guanacaste (el rasgo montañoso más importante en el noroeste del país), conformada por 4 edificios volcánicos de composición andesítica de edad cuaternaria (Orosí-Cacao, Rincón de la Vieja-Santa María, Miravalles y Tenorio-Montezuma) y una meseta ignimbrítica (Santa Rosa), constituida por rocas silíceas que se extiende desde las faldas de los volcanes hasta la costa del Océano Pacífico (Fig. 1.1).

Ante la crisis energética mundial de los años 1973 y 1974, el ICE reacciona impulsando los estudios de reconocimiento del recurso geotérmico en los sectores más prometedores seleccionados por los expertos de las Naciones Unidas. Este trabajo abarcó un área aproximada

de 500 km², incluyó la exploración básica superficial mediante métodos geológicos, geoquímicos y geofísicos; así como, la perforación de una serie de pozos de gradiente y en 1976 se presentó el informe de prefactibilidad técnica (GeothermEx, 2005). Se continúa con las investigaciones y en 1978, se recomienda perforar 3 o 4 pozos profundos en las faldas del volcán Miravalles (ICE, 1986).

Entre 1989 y 1991, se desarrolla un estudio de reconocimiento general del país, con el objetivo de cuantificar el potencial geotérmico y determinar las componentes del potencial en términos de recursos y reservas utilizables para diferentes tipos de aplicación práctica, en el cual se clasificaron diferentes áreas de interés y se estimó un potencial geotérmico de 900 MWe (ICE, 1991).

2.3.1 Campo Geotérmico Miravalles

Entre 1979 y 1980 se perforaron los primeros tres pozos profundos en el Campo Geotérmico Miravalles, interceptando un reservorio geotérmico con una temperatura cercana a los 240 °C (ICE, 1986). Entre 1985 y 1986 se perforan 6 pozos más. En 1987, con base en los datos recolectados se genera el informe de factibilidad de la primera planta geotérmica (Moya, et al., 2002). En 1992, se inicia una nueva etapa de perforación profunda, la cual logra su objetivo en 1994 con la inauguración de la primera unidad de 55 MWe. En los primeros meses de 1995, una unidad de 5 MWe de descarga atmosférica fue adicionada al sistema. En agosto de 1998 inicia la producción de la segunda unidad de 55 MWe, y para marzo del 2000 comienza a generar 29,5 MWe la Unidad 3. En diciembre del 2005 se inaugura la Unidad 5 de 19 MWe, para un total de 163,5 MWe (Mainieri, 2005).

2.3.2 Campo Geotérmico Las Pailas

En el área de Las Pailas, después de los primeros estudios iniciados en 1974, periodo en el cual se perforaron 7 pozos de gradiente. Debido al potencial geotérmico presente en la región, en las dos décadas siguientes se realizaron estudios geológicos, geofísicos y geoquímicos de forma intermitente, acompañado de una segunda etapa de perforación de gradiente entre 1995 y 1996, en la cual se perforaron 5 pozos más (Molina, 2000). En enero del 2000, el ICE decide retomar el desarrollo de un proyecto geotérmico en el área de Las Pailas, dando inicio a los estudios de factibilidad, culminando con la perforación de 5 pozos exploratorios. Como resultado, tres pozos productores corroboraron la existencia de un yacimiento geotérmico, con temperaturas del orden de 250 °C, apto para la producción comercial de electricidad (GeothermEx, 2005). En mayo del 2008, dio inicio el desarrollo de la primera etapa del campo geotérmico Las Pailas (CGP), y su producción comercial inició en el 2011 con 41.6 MWe

brutos. Actualmente se está en el proceso de desarrollo (etapa de perforación), con el fin de instalar una segunda unidad de 55 MWe.

2.3.3 Zona Geotérmica Borinquen

Uno de los sectores con potencial geotérmico detectado durante los estudios de reconocimiento realizados por el ICE, es conocido como Borinquen, se localiza en la falda oeste del volcán Rincón de la Vieja, Liberia, Guanacaste; a 240 km al noroeste de San José, capital de Costa Rica (Fig.1.1). En esta área, la exploración se inició en 1974 y por cuatro décadas se han ejecutado trabajos de forma intermitente; a la fecha se han realizado estudios geológicos, geoquímicos, geofísicos y 4 perforaciones de exploración con profundidades cercanas a 2500 m.

Las perforaciones se realizaron en dos periodos, del 2004 a 2005 se construyeron los pozos PGB 01 y PGB 03, de forma vertical, en ese momento los resultados no fueron alentadores, aunque el PGB 01 interceptó un reservorio geotérmico con temperatura cercana a 280 °C, los valores de presión de cabezal y de flujo total medidos no permitían aprovechar el recurso mediante una planta de condensación. Por otra parte, el PGB 03, con una profundidad de 2082 m, alcanzó una temperatura máxima de 210 °C y aceptó 30 l/s; lo que indicó que esta perforación se ubicó fuera del área del reservorio de alta entalpía. Estos resultados obligaron a reanalizar la información existente y plantear más campañas de investigación, culminando con la definición de nuevos objetivos de perforación. Entre el 2012 y 2013, se retomó la campaña de perforación, se construyó de forma direccional los pozos PGB 02 y PGB 05, cuyos resultados cambiaron el panorama, lo que ha permitido programar para el primer semestre del 2018 el inicio del desarrollo del campo geotérmico Borinquen, que busca el recurso geotérmico para instalar la primera unidad de 50 MWe.

Por consiguiente, al día de hoy Costa Rica cuenta con 205 MWe geotérmicos instalados, distribuidos en dos campos: Miravalles 163,5 MWe y Las Pailas 41,6 MWe. No obstante, para el 2019, la segunda unidad de Las Pailas debe estar generando 55 MWe y para el 2023 se tiene programado inaugurar la primera unidad de Borinquen, que aportará 50 MWe al sistema. Con lo cual, la matriz eléctrica de Costa Rica contará con 310 MWe geotérmicos.

Resultados

3.1 Modelo volcanológico estructural del área de estudio

El estudio consiste en un levantamiento geológico orientado a identificar y caracterizar las unidades volcano-estratigráficas y estructuras distribuidas en los alrededores del volcán Rincón de la Vieja, en busca de obtener la mayor comprensión de los eventos relacionados con la evolución volcano-tectónica del área. Se describen las rocas aflorantes, se complementa con el análisis de núcleos y ripios de rocas obtenidos de perforaciones para identificar y definir la estratigrafía; además, se realizan dataciones radiométricas (Ar/Ar) para establecer el orden cronoestratigráfico. Paralelamente, se identifican rasgos morfotectónicos por medio de sensores remotos, durante el trabajo de campo se efectúa el levantamiento de datos estructurales, distribución de manifestaciones termales; información que se complementan con la reinterpretación de datos gravimétricos y el análisis de la distribución de eventos sísmicos (inducidos y naturales).

3.1.1 Estratigrafía

Trabajos previos tratan de manera detallada la volcano-estratigrafía de esta área (Kempter, 1997; Zamora et al., 2004, Deering, 2005); algunos señalan ciclos de actividad que inician con la instauración de edificios volcánicos y posterior destrucción por eventos caldéricos, que se han llevado a cabo cerca del eje volcánico actual y cuyos productos han contribuido a la formación de la Meseta Ignimbrítica Santa Rosa (Fig. 1.1). En este estudio se hace uso de la estratigrafía general establecida por autores anteriores, pero se modifica parcialmente a la luz de los resultados obtenidos del trabajo de campo y datos derivados del análisis de ripios y núcleos de perforaciones. En esta sección se describe la distribución espacial y temporal de los productos relacionados con la evolución volcánica de la zona, y se demuestra que la Formación Liberia es la principal unidad estratigráfica y volcanológicamente relacionada con la formación de una caldera, lo que permite su uso como horizonte de referencia. Por consiguiente, para facilitar la descripción de las rocas

en el área de estudio, la estratigrafía se ha dividido informalmente siguiendo el orden cronológico en: pre-, sin-, y post-Formación Liberia.

3.1.1.1 *Unidad Pre-Formación Liberia*

Esta unidad estratigráfica se encuentra infrayaciendo la Ignimbrita de Liberia en la mayor parte del área de estudio. Incluye en su base un basamento volcano-sedimentario del Paleoceno Superior-Mioceno Medio (Zamora et al 2004). Material fuertemente alterado hidrotermalmente, formado por areniscas medias a gruesas y lutitas grises, brechas volcanoclástica silicificadas y algunos depósitos piroclásticos menores. Este basamento volcano sedimentario esta sobreyacido de forma discordante por el Grupo Aguacate, materiales que a nivel regional constituye el volcanismo del Terciario, el cual esta principalmente compuesto por flujos de lavas andesíticas y depósitos piroclásticos, en partes intruidos por diques de carácter andesítico y en menor proporción granodioríticos, (Laguna, 1984; Kussmaul, 2000). Este grupo no aflora en el área de estudio; sin embargo, ha sido identificado en las perforaciones del campo geotérmico Las Pailas (CGP), con un espesor máximo de 1868 m en el PGP-10, sin llegar a alcanzar su base (Figs. 3.1 y 3.2).

La unidad estratigráfica pre-Formación Liberia continúa con el Grupo Bagaces, el cual forma la mayor parte de la Meseta Ignimbrítica de Santa Rosa. Se extiende desde la base de los actuales edificios volcánicos hasta la costa del océano Pacífico, y es sobreyacido de forma discordante por la Formación Liberia. Con base en la estratigrafía de pozos, este grupo presenta un espesor máximo de 1077 m (PGP 05) en el campo geotérmico Las Pailas, área donde su techo se encuentra a una elevación promedio de 200 m s.n.m. Mientras que, en el sector de Borinquen el espesor máximo perforado es de 749 m (PGB 01), sin llegar a alcanzar su base, pues el techo se localiza hacia los -1146 m s.n.m. (Fig. 3.2). Respecto a la edad, se interpreta un periodo de depositación que abarca de 8,75 a 1,43 Ma. De acuerdo a las características litológicas de las rocas aflorantes, este grupo se divide formalmente en varias unidades que no fueron distinguidas en este estudio: unidad Curubandé, constituida por ignimbritas de composición andesítica, datado en $8,75 \pm 0,87$ Ma. (en este trabajo); unidad Góngora Viejo, formada por dacitas, con zonas brechosas con presencia de xenolitos y pómez, la edad radiométrica obtenida es de $7,96 \pm 0,53$ Ma. (en este trabajo); Formación Alcántaro, descrita por Kempter (1997), lavas de composición dacítica cubiertas por una ignimbrita soldada con estructuras de reo-morfismo, ocasionalmente se presentan delgados flujos piroclásticos poco consolidados y sedimentos lacustres intercalados, su edad de $2,2 \pm 0,019$ Ma. fue obtenida por Carr et al. (2007); y Unidad Santa Fé, descrita por Deering (2005), son piroclastos de 6 a 15 m de espesor, con pómez desde 2 a 30 cm, así como aglomeraciones de cristales de plagioclasas, anfíbol y óxidos de hierro-titanio y pómez claras con bandeamientos.

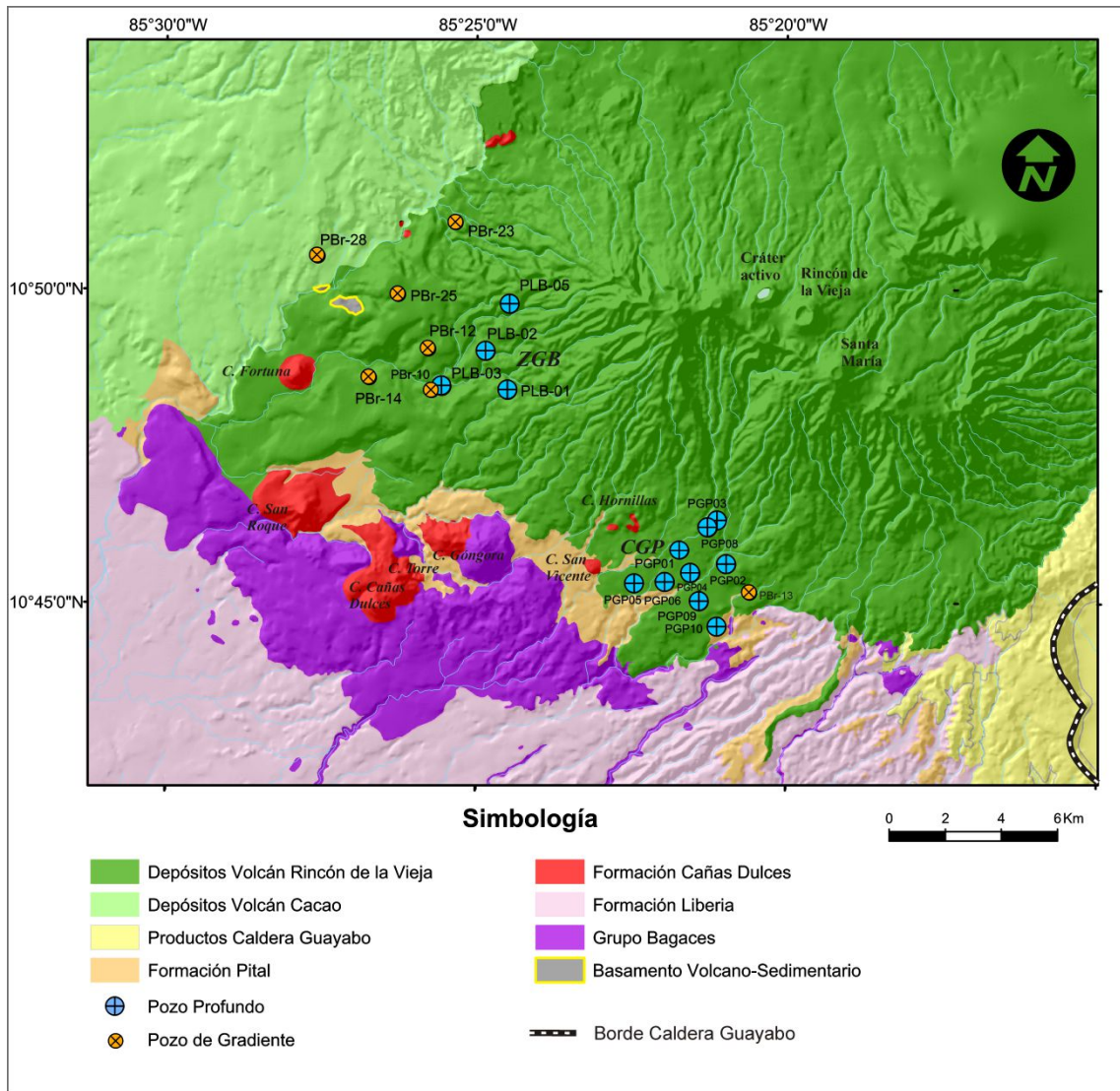


Figura 3.1: Mapa geológico simplificado del área de estudio basado en trabajos previos (Kempter, 1997; Zamora et al., 2004,) y esta investigación.

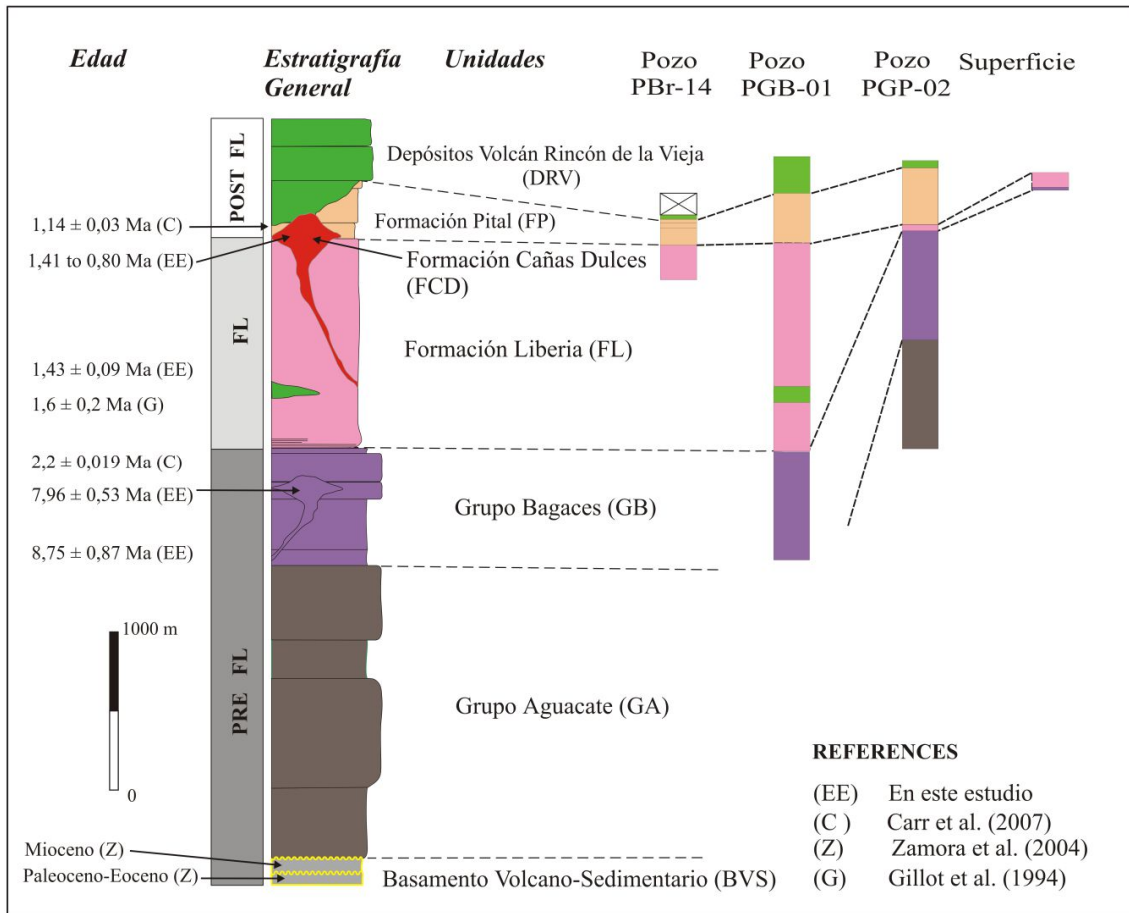


Figura 3.2: Columna estratigráfica general con edades radiométricas del área de estudio, basada en correlación de pozos de la zona geotérmica Borinquen, campo geotérmico Las Pailas y datos de afloramientos.

Tabla 3.1: Edades radiométricas de rocas del área de estudio.

Código	Litología	Ubicación	Latitud	longitud	Minerales analizados	Edad (Ma)	Referencia
PSL-16-16-9-10	Flujo piroclásticos dacítico	Quebrada I Griega	10°42'60"	85°21'40"	K-feldespatos	8,750±0,870	En este trabajo
CGO-1-12-10-10	Dacita rica en Hornablenda	Cerro Góngora Viejo	10°45'47"	85°24'47"	Plagioclasa	7,960±0,530	En este trabajo
πG49s	Dacita	Cabuyal	10°67'93"	85°63'94"	Vidrio	7,810±0,160	Guillot et al 1994
					Plagioclasa	7,990±0,160	
						7,850±0,160	
πG49O	Ignimbrita	Pijije	10°52'31"	85°33'17"	Vidrio	1,393±0,030	Guillot et al 1994
					Plagioclasa	1,420±0,030	
					biotita	1,830±0,030	
						1,610±0,060	
πG49A	Ignimbrite	Salitral, Bagaces	10°59'48"	85°24'52"	Vidrio	1,600±0,050	Guillot et al 1994
					Plagioclasa	1,551±0,060	
						1,270±0,030	
						1,310±0,030	
Cu-38	Hornblende dacita	Cerro San Roque I	10°77'40"	85°46'42"	?	1,6 ± 0,5	Bellon & Tournon 1978
SJL-1-19-8-10	Flujo piroclásticos riolítico	San Jorge	10°42'16"	85°20'59"	K- feldespatos	1,430±0,090	En este trabajo
CSR-2-6-10-10	Dacita rica en Hornablenda	Cerro San Roque	10°46'41"	85°27'39"	K- feldespatos	1,410 ±0,180	En este trabajo
CSV-1-14-10-10	Dacita rica en Hornablenda	Cerro San Vicente I	10°45'30"	85°23'0"	K- feldespatos	1,370±0,070	En este trabajo
CFO-1-18-9-10	Dacita rica en Hornablenda	Cerro Fortuna I	10°48'45"	85°27'49"	K- feldespatos	1,310 ±0,010	En este trabajo
CHO-1-12-10-10	Dacita rica en Hornablenda	Cerro Hornillas	10°46'10"	85°22'28"	K- feldespatos	1,250 ±0,070	En este trabajo
Cr-RV-02-06	?	Cuesta Diablo	10°78'0"	85°42'1"	matriz	1,14 ± 0,030	Carr et al 2007
CCD-1-6-10-10	Dacita rica en Hornablenda	Cerro Cañas Dulces	10°44'58"	85°26'36"	Plagioclasa	0,980 ±0,050	En este trabajo
CGO-2-69-10	Dacita rica en Hornablenda	Cerro Góngora Joven	10°46'1"	85°25'30"	K- feldespatos	0,800 ±0,040	En este trabajo
?	Amber	Quebrada Grande	10°84'44"	85°49'28"	C	3490±105	Melson 1988

3.1.1.2 Formación Liberia

De acuerdo a la extensión, volumen, facies, y variación del espesor, la Formación Liberia es la única unidad que puede ser estratigráficamente correlacionada con la formación de un colapso caldérico en el área de estudio. Aunque diversos autores (Chiesa, 1991, Kempter 1997, Vogel et al., 2004; Deering et al., 2007) han estudiado esta ignimbrita y sugieren que se derivó de una erupción caldérica, nadie ha establecido una correlación clara con la formación de alguna caldera en particular.

Los resultados del trabajo de campo muestran que la Formación Liberia está distribuida radialmente alrededor del flanco suroeste del volcán Rincón de la Vieja, se ubica principalmente en la vertiente Pacífica de este macizo volcánico sobre una superficie total de ~4000 km², se extiende desde La Cruz hasta Bijagua (Figs. 1.1 y 3.1), con espesores que oscila de 0,8 a 120 m. También existen afloramientos aislados en la vertiente Caribe, con espesores que no superan los 4 m. En los pozos de Borinquen esta formación tiene espesores que varían de 1299 a 1692 m; mientras que al sureste, en el área correspondiente al campo geotérmico Las Pailas, el espesor máximo es de 39 m en el pozo PGP 02 (Fig. 3.2, Tabla 3.2).

Tabla 3.2: Espesores de la Formación Liberia medidos en las perforaciones de la zona geotérmica Borinquen y el campo geotérmico Las Pailas.

Pozo	Cota inicial m s.n.m.	Cota final m s.n.m.	Espesor m	Ubicación
PGB 01	153	-1146	1299	Zona Geotérmica Borinquen
PGB 02	249	Nd	> 1692	
PGB 03	176	-1177	1353	
PGB 05	-51	-1169	1118	
PBr 10	247	Nd		
PBr 12	257	Nd		
PBr 14	144	Nd		
PBr 25	0	Nd		
PGP 02	277	238	39	Campo Geotérmico Las Pailas
PGP 06	212	209	3	
PGP 09	317	305	12	
PGP 10	395	386	9	
PP 13	334	330	4	

La Formación Liberia incluye en su base secuencias bien estratificadas de piroclastos de caída, cenizas, niveles con lapilli acresional y pequeñas oleadas, con un espesor total entre 0,3 y 2,5 m, con una distribución areal irregular. Este depósito basal grada a un aparente flujo masivo que corresponde con la ignimbrita de Liberia. Consiste en una ignimbrita dacítica-riolítica rica en pómez (con un 10 % de cristales), y fragmentos líticos principalmente derivados de los Grupos

Aguacate y Bagaces, e intrusiones subvolcanicas, inmersos en una abundante matriz rica en ceniza constituida por fragmentos de vidrio, cristales de plagioclasas, cuarzo, biotita, así como, esporádicos anfíboles y piroxenos. Ocasionalmente, esta ignimbrita esta internamente estratificada, hecho que refleja la superposición de flujos, y la distribución irregular de horizontes ricos en líticos con clastos sobre 1 m de diámetro. Algunos pozos han revelado una delgada estratificación de granulometría fina de depósitos de caída y surge en la parte superior de la ignimbrita Liberia que no ha sido identificada en la superficie, probablemente debido a la subsecuente erosión. Los depósitos de la Formación Liberia tienen un color blanco, pero en ciertos lugares es ligeramente de tonalidad rojiza a rosada. En algunos pozos estudiados, esta Formación está intruida por rocas andesíticas, que se han asociado con intrusiones subvolcánicas relacionadas con el volcán Rincón de la Vieja. Con base en una datación de K/Ar Gillot et al (1994) asignan una edad de $1,6 \pm 0,2$ Ma. Sin embargo, nuevos resultados Ar/Ar obtenidos como parte de esta tesis, asignan una edad de $1,43 \pm 0,09$ Ma. (Tabla 1), el cual corresponde a un dato más afín a la relación estratigráfica observable y a las edades existentes para las rocas pre- y post- caldera (Fig. 3.2).

3.1.1.3 *Post- Formación Liberia*

En esta unidad se incluye todos los materiales volcánicos aflorantes en el área de estudio originados posterior a la depositación de la Formación Liberia, constituido por: una serie de domos dacíticos (Formación Cañas Dulces), secuencias piroclásticas con intercalaciones de sedimentos lacustres y epiclásticos (Formación Pital), y flujos de lava de composición de andesítico a andesítico-basálticas relacionadas con vulcanismo acaecido antes y durante la instauración del volcán Rincón de la Vieja-Santa María. Adicionalmente, dos unidades más ubicadas fuera del área de estudio fueron mapeadas con el fin de completar el mapa geológico regional: los Productos de la Caldera Guayabo (flujos piroclásticos y lavas) al sureste y Depósitos del Volcán Caco (lavas andesíticas y debris avalnache) en el noroeste (Fig. 3.1).

La Formación Cañas Dulces incluye un grupo de siete domos dacíticos constituidos por plagioclasas, hornblenda verde, clino y ortopiroxenos, trazas de biotita y opacos, en una matriz porfírica a glomero porfírica, desvitrificada con abundantes esferulitos. Similares rocas han sido descritas en el sector noroeste del área de estudio en pequeños afloramientos dispersos (Fig. 3.1). Aunque estos domos fueron inicialmente datados en $1,55 \pm 0,5$ Ma y $1,6 \pm 0,5$ Ma (ICE, 1976; Bellon & Tournon, 1978), nuevas dataciones de Ar/Ar (Tabla 3.1) obtenidas durante el desarrollo de este estudio acotan el emplazamiento de estos domos en un periodo que va desde 1,41 hasta 0,80 Ma.; más consistentes con la estratigrafía relativa y las nuevas edades dadas para la Formación Liberia.

La Formación Pital (Kempster, 1997) consiste en sucesiones de depósitos de caída ricos en pómez y flujos piroclásticos de composición dacítica, intercalados con esporádicos depósitos epiclásticos, lacustres y en menor cantidad lavas andesíticas. Su espesor oscila de 180 m (PGP 05) a 347 m (PGP 03) en el campo geotérmico Las Pailas y de 5 m (PBr 16) a 445 m (PGB 05) en la zona geotérmica Borinquen (Fig. 3.1 y 3.2). Esta unidad fue emplazada en un período estimado entre 1,43 Ma. y 0,8 Ma.

Finalmente, los Depósitos del volcán Rincón de la Vieja cubren las formaciones previas de forma discontinua, corresponden principalmente a flujos de lavas de composición andesítico (contienen abundantes fenocristales de: plagioclasas y en menor cantidad clinopiroxenos, ortopiroxenos, y opacos) y basáltico que se diferencian por su contenido de olivino; con un espesor total de hasta 450 m (PGB 05). Su edad oscila de $1,14 \pm 0,03$ Ma (Carr et al., 2007) al presente; algunos depósitos piroclásticos (3490 ± 105 años A.P., Melson, 1988) y flujos de detrito están presentes en la parte superior de esta secuencia.

3.1.2 Geología Estructural

Para identificar las características de las principales estructuras (fracturas y fallas) que afectan el área de interés, se realizó un análisis por medio de sensores remotos, en el cual se distinguió los principales lineamientos morfológicos del área, y con el fin de confirmar la naturaleza tectónica, se llevó a cabo un estudio estructural de campo, que se complementó con el análisis de la distribución espacial de manifestaciones termales, anomalía gravimétrica y sismicidad; estos tres elementos son buenos indicadores de la existencia y localización de fracturas y fallas tectónicas (Price and Cosgrove, 1990; Gudmundsson, 2011).

3.1.2.1 Sensores Remotos

Para realizar el estudio de los rasgos morfotectónicos regionales, se empleó una imagen de la plataforma Aster del 2008 (principalmente las 4 bandas del visible/cercano VNIR, con una resolución de 15 m), parte del modelo de elevación digital (MED) coloreado y sombreado de América central; con una resolución espacial de 90 m, obtenida por la misión SRTM (acrónimo en inglés de Shuttle Radar Topography Mission) de febrero del 2000. Para elaborar un análisis más exhaustivo se utilizó: fotografías aéreas analógicas pancromáticas de noviembre de 1987 (escala 1: 35000), fotografías digitales en color verdadero de enero de 1996 (resolución 3 m), una imagen RapydAye, con resolución de 5 m del 2010 y un MED, generado de las curvas de nivel cada 20 m de los mapas topográficos escala 1:50000 del Instituto Geográfico Nacional de Costa Rica. El análisis de este material permitió identificar cuatro sistemas principales de lineamientos: NE-SW, NW-SE, N-S y E-W.

El sistema regional NE-SW (incluye desde LR1 al LR6, Fig. 3.3), afecta los macizos volcánicos Rincón de la Vieja-Santa María y Miravalles. Los cauces de algunos ríos corren en esta dirección, principalmente en los valles que dividen los macizos volcánicos (LR1 río Ahogados, LR4 río Liberia y LR6 río Tenorio). Adicionalmente, sobre la traza LR1 se mapeó intensa alteración hidrotermal, habiendo encontrado hacia su extremo NE de forma aislada lavas de composición dacítica, pertenecientes a la Formación Cañas Dulces (Figs. 3.1 y 3.4). Sobre la traza LR2 se encuentra el domo Fortuna ($1,31 \pm 0,08$ M.a.), que también pertenece a la Formación Cañas Dulces, a lo largo de esta traza hay numerosas manifestaciones termales. El lineamiento LR3 es el de mayor envergadura (65 km), exhibe un azimut promedio de 45° , se extiende desde las cercanías de la costa pacífica, hasta las faldas del sector atlántico del macizo volcánico Rincón de la Vieja-Santa María, dividiendo el edificio volcánico. A lo largo de este plano de debilidad se han emplazado domos en distintos periodos: Góngora Viejo ($7,96 \pm 0,53$ M.a.), Hornillas ($1,25 \pm 0,07$ M.a.) y Cañas Dulces ($0,80 \pm 0,04$ M.a.), sugiriendo su naturaleza tectónica. El sistema NE-SW a nivel local (Fig. 3.4), presenta 6 lineamientos (desde el LL1 hasta el LL6). La influencia de este grupo de lineamientos se aprecia en la orientación del patrón de drenaje, así como en la presencia de manifestaciones termales en sus trazas. Además, la morfología del cráter activo del Rincón de La Vieja sugiere estar afectado por el lineamiento LL3.

El sistema NW-SE es menos prominente a escala regional; se distinguen tres lineamientos (LR7, LR8 y LR9, Fig. 3.3). Las trazas LR7 y LR8 delimitan el borde sur la meseta Ignimbrítica Santa Rosa. El extremo sureste del LR8 ha sido identificado como una falla inversa en el Mapa Geológico de Costa Rica 2007 (Denyer & Alvarado, 2007). En la vertiente Caribe se localiza el lineamiento LR9, separa los edificios volcánicos Rincón de la Vieja y Miravalles de las llanuras del norte de Costa Rica, es una franja levantada de unos 150 m de altura, 2,5 km de ancho, y se extiende por una longitud aproximada de 25 km. Astorga et al., (1991), lo asocia con la prolongación del graben de Nicaragua y Montero et al., (1998) lo denomina falla Caño Negro. A nivel local se ha marcado la traza LL7 al sur del campo geotérmico Las Pailas, siendo evidente su efecto en los ríos Negro y Colorado, donde provoca que los cauces presenten ángulos hasta de 90° (Figs. 3.3 y 3.4).

El sistema N-S es bien definido a nivel regional. Se identificó 4 lineamientos principales, desde LR10 al LR13 (Fig. 3.3). El LR10 presenta un azimut promedio de 5° y una longitud de 27 km, parte de este lineamiento fue identificado como falla Liberia (Denyer et al., 2003). El LR11, se observa al norte, cortando el edificio volcánico Orosí-Cacao. El LR13 se aprecia atravesando el volcán Miravalles, tiene una longitud de 39 km, es el lineamiento de mayor importancia del sistema N-S. A mayor detalle, se distinguen 4 lineamientos N-S. El LL8 marcado por los cauces del río Colorado y la Quebrada Yugo, su naturaleza tectónica ha sido confirmada por las perforaciones direccionales orientadas hacia el este desde las plataformas de los pozos PGP-2 y

PGP-8. Los demás lineamientos (LL9, LL10 y LL11), se evidencian por el efecto en cauces de ríos, domos y presencia de manifestaciones termales (Fig. 3.4).

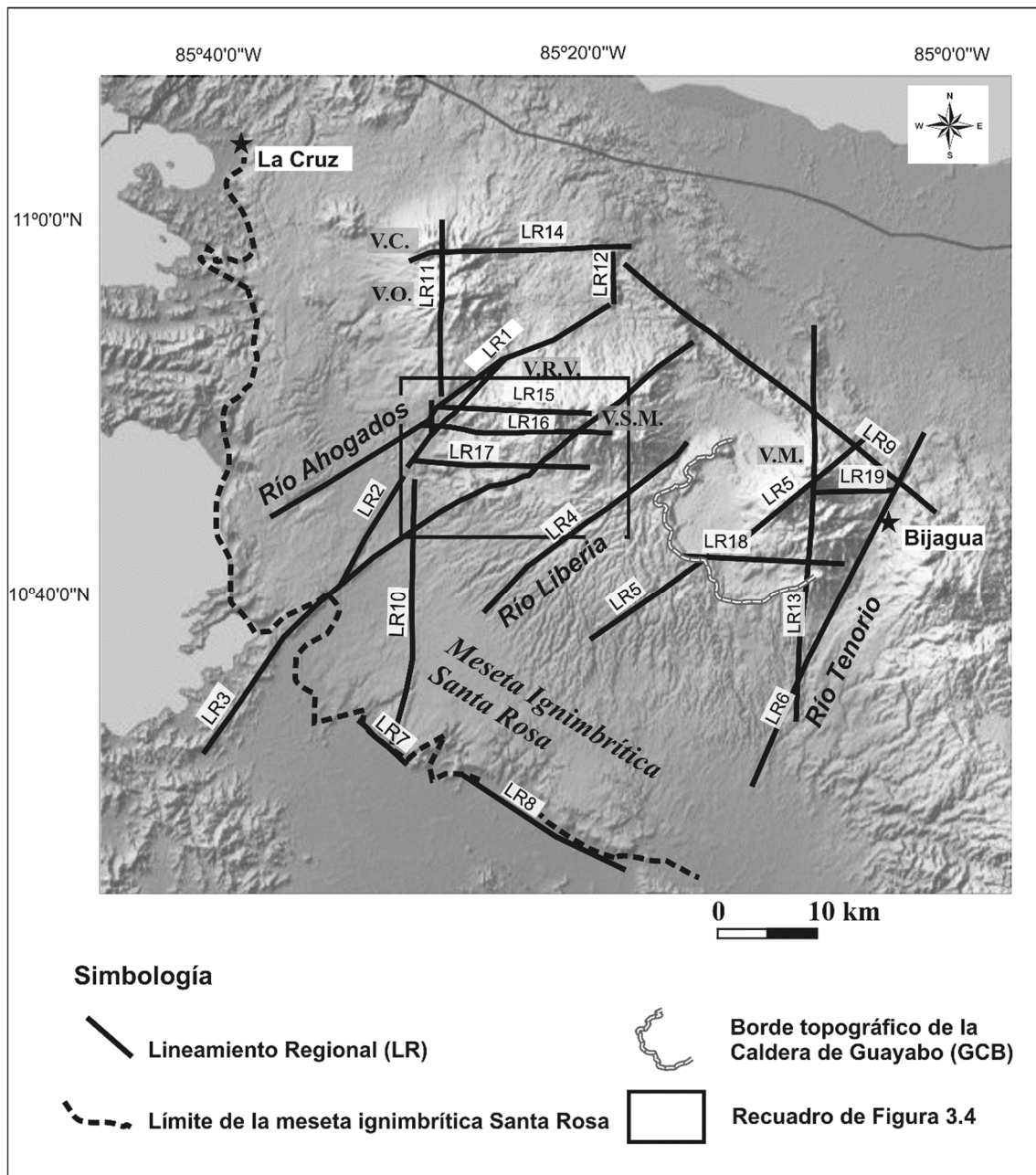


Figura 3.3: Características morfológicas más relevantes a nivel regional de los complejos volcánicos Rincón de la Vieja – Santa María, Miravalles y zonas adyacentes: edificios volcánicos Cacao (V.C.), Orosí (V.O.), Rincón de la Vieja (V.R.V.), Santa María (V.S.M.), y Miravalles (V.M.), Meseta Ignimbrítica Santa Rosa, sistemas de lineamientos regionales, principales ríos, límite topográfico de la caldera de Guayabo.

El sistema E-W incluye los lineamientos desde LR14 hasta LR19 (Fig. 3.3), presentan un azimut promedio de 95° y es claramente visible en los edificios volcánicos Rincón de la Vieja – Santa María y Miravalles. En la parte alta del volcán Rincón de la Vieja, seis cráteres y una corona de deslizamiento generada al colapsar parte del edificio volcánico, forman un segmento del LR15.

La traza del LR16 inicia al E con un cráter del volcán Santa María, continuando sobre el cauce del río Salitral (en el cual, afloran manifestaciones termales), y culminando en el extremo W con el Domo Fortuna. Los domos San Roque y Hornillas, en conjunto con el cauce de la quebrada Dos Quebradas evidencian el LR17. El lineamiento LL12 se observa a nivel local, su traza se aprecia desde el domo San Vicente, pasando por los domos Góngora Joven y Tibio, continuando al sur del domo San Roque, y parte del cauce del río Tizate. Otro lineamiento local (LL13) se identificó al norte del área de estudio, iniciando desde el LR2, y claramente definido por el ángulo de 90° de varios cauces de ríos localizados en el flanco norte del volcán Rincón de la Vieja (Fig. 3.4). Los lineamientos LR14, LR18 y LR19, se ubican en los volcanes Orosí y Miravalles, respectivamente.

Por otra parte, se observa la presencia de fumarolas con temperaturas del orden de 98°C relacionadas con algún lineamiento o intersección de lineamientos, por ejemplo, en el sector de Las Pailas con el lineamiento LL8, cerca del cerro Hornillas con la intersección de lineamientos LR3 - LR17 - LL2 - LL9, en Borinquen con los lineamientos LR16 - LL10 - LL4 (Río Salitral) y LR15 - LL5 - LL6 (quebrada Gata). Además, en la parte alta del volcán Rincón de la Vieja – Santa María, los cráteres se aprecian asociados a la traza de los lineamientos LR16, LR15 y LL3, en intercepciones (LR3 - LR15, LL4 - LR15).

3.1.2.2 Datos de campo

En contraste con la cantidad de lineamientos morfotectónicos que se aprecian por medio de sensores remotos, los datos estructurales de campo son escasos; debido a las edades recientes de los productos generados por la actividad del macizo volcánico Rincón de la Vieja – Santa María, que cubren gran parte del área de interés; aunado a un fuerte intemperismo y la cobertura vegetal que tienden a ocultar las evidencias de fracturamiento en algunos sectores. Los rasgos estructurales identificados corresponden con fallas, fracturas y diaclasas, en su mayoría subverticales, cerradas, con longitudes entre 1- 25 m. Se identificó 377 estructuras, en ellas se midió el rumbo, ángulo de buzamiento y movimiento relativo cuando estaban marcadas por las discontinuidades estratigráficas. Sin embargo, pocos indicadores cinemáticos fueron observados en los planos de falla.

Los sistemas de fracturas orientados NE-SW y NW-SE predominan en los conglomerados y lavas andesíticas del Holoceno, en los cuales las fracturas con orientación N-S y E-W son menos abundantes. En las secuencias del Plioceno-Pleistoceno (flujos piroclásticos y lacustres) de la Formación Pital, las fracturas muestran orientaciones preferenciales NE-SW y E-W; y en menor proporción NW-SE y N-S. En el río Tizate, fracturas NE-SW forman un graven con un desplazamiento del orden de 10 m; mientras que en la quebrada Tibio la Formación Pital es cortada por una falla de rumbo N-S con aparente desplazamiento dextral. El Grupo Bagaces

debido al amplio rango de edad que abarcan sus rocas, exhiben mayor variabilidad en la dirección de las fracturas, con orientaciones: N-S, NE-SW, NW-SE y E-W (Figs. 3.1 y 3.4).

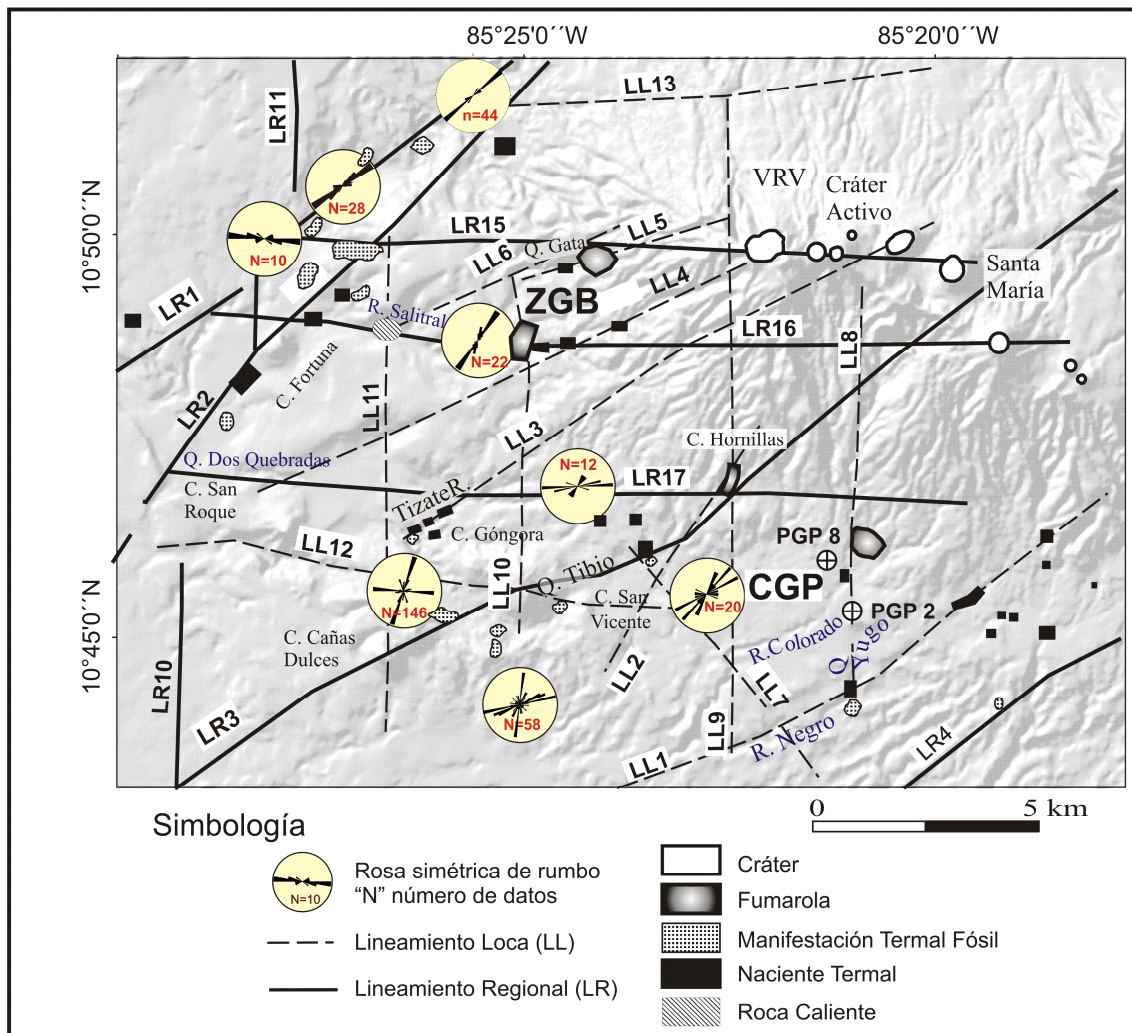


Figura 3.4: Principales lineamientos morfológicos, datos de campo y distribución espacial de manifestaciones termales (fumarolas, roca caliente, nacientes termales, manifestaciones termales fósiles y cráteres del área de estudio. Volcán Rincón de la Vieja (V.R.V.), campo geotérmico Las Pailas (CGP), Zona geotérmica Borinquen (ZGB).

Los diagramas de rosas simétricas de rumbo obtenidas con los datos de campo reafirman en el área de estudio y alrededores dos direcciones predominantes de fracturamiento NE-SW y E-W; que se correlacionan con los lineamientos morfológicos regionales y locales. La presencia de corrimientos y escarpes a lo largo de los lineamientos LR15 (E-W) y LR1 (NE-SW) al noreste del domo Fortuna, confirman la naturaleza tectónica (Fig. 3.4). En el sector de Borinquen (quebrada Gata), el sistema NE-SW predomina formando un ángulo de unos 15° respecto al lineamiento LL6. Al sur del cerro Góngora, hay una correspondencia entre los datos de campo y los lineamientos LR3 (NE-SW), LL12 (E-W) y LL10 (N-S). Al NE del cerro Góngora, las fracturas medidas revelan la influencia del lineamiento LR17 (E-W). Los datos obtenidos al este

del cerro San Vicente, denotan tendencias NE-SW, paralelos a los lineamientos LL2 y el LR3 (Figs. 3.4).

3.1.2.3 *Gravimetría*

Desde finales de la década de los años 80 del siglo anterior, se han realizado campañas de medidas gravimétricas en la vertiente pacífica del volcán Rincón de la Vieja (GeothermEx, 1999, GeothermEx, 2005). Por ser la gravimetría un método que muestra contrastes de densidad, se utilizan los resultados obtenidos en esas investigaciones como una correlación adicional de las características morfoestructurales identificadas en el área de estudio y alrededores.

El mapa de anomalías de Bouguer (Fig. 3.5), sugiere la existencia de un mínimo relativo, que oscila entre -10 y -6 mGal, con una forma a grosso modo triangular, que se extiende desde Borinquen hasta el CGP, con orientación NO-SE, y longitud de 13,5 km. Una de sus aristas se orienta NW-SE desde las cercanías del cerro Fortuna hasta el CGP, el otro lado se orientado al NE, desde el mismo cerro hacia el pozo PBr 23, y el tercer lado y más largo se extiende desde esta perforación hasta el CGP. Hacia el sureste este mínimo relativo está limitado por el lineamiento LR3, en los alrededores de los cerros Hornillas y San Vicente. Mientras que, hacia el sur, está limitado por un gradiente gravimétrico que alcanza máximos relativos del orden de 4 mGal, probablemente como respuesta a los cuerpos intrusivos constituidos por los domos: Góngora, Cañas Dulces, y San Roque. Hacia el oeste, el gradiente es menos pronunciado, alcanza valores de 0 mGal, es limitado por el lineamiento LR2. Sin embargo, esta forma triangular no corresponde a la distribución real del cuerpo de baja densidad que origina esta anomalía gravimétrica, ya que, hacia el noreste, donde los datos disponibles son escasos, es probable que el efecto positivo sea causado por el complejo volcánico Rincón de la Vieja-Santa María. De hecho, los pozos (PGB 01, PGB 2, PGB 03, y PGB5), localizados hacia el centro del mínimo gravimétrico donde los valores son del orden de -8 mGal, se perforó en promedio 1350 m en la Formación Liberia (Fig. 3.2, Tabla 3.2), que tiene una densidad más baja que las rocas circundantes (Fig. 3.5). Por otra parte, hacia el sureste de la RL3, hay otro mínimo gravimétrico, pero menos pronunciado que el descrito previamente. Este fue interpretado por Molina (2000) como una estructura caldérica (San Vicente), donde se desarrolló el campo geotérmico Las Pailas I (Fig. 3.5).

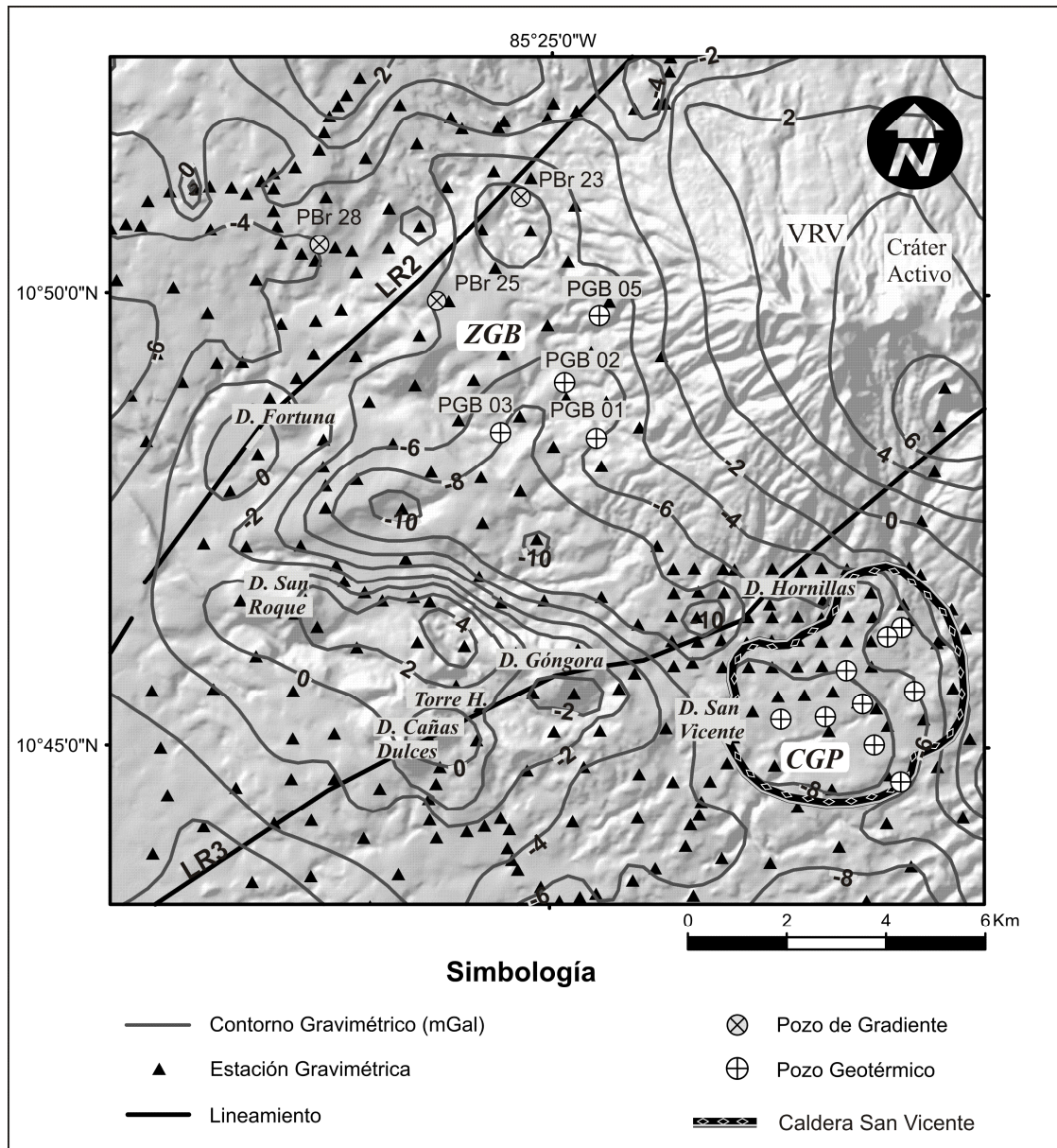


Figura 3.5: Mapa de la anomalía gravimétrica de Bouguer del área de estudio reducida a una densidad de 2.3 g/cm^3 , V.R.V. – volcán Rincón de la Vieja. CGP – campo geotérmico Las Pailas, ZGB – zona geotérmica Borinquen; LR – lineamiento regional.

3.1.2.4 Localización de sismos

En el análisis estructural también se consideró la localización de los eventos sísmicos, registrados como parte de la vigilancia que el ICE lleva a cabo en los campos geotérmicos y alrededores por medio de la red de monitoreo del Observatorio Sismológico y Vulcanológico de Arenal y Miravalles (OSIVAM). Se han analizado eventos naturales, así como inducidos durante la reinyección de fluidos geotérmicos en pozos profundos. Aunque parte de estos sismos son el resultado directo del movimiento del agua, se considera que otro grupo es inducido por cambios de esfuerzos en el medio generado por un transiente de presión. Para facilitar el análisis, se han dividido los eventos sísmicos en 3 familias, utilizando como criterio la profundidad (Fig. 3.6).

Los sismos con profundidades menores o igual que 4 km son los más numerosos, se concentran en enjambres alrededor de los pozos reinyectores. En el CGP se observan dos concentraciones principales en la vecindad de los pozos reinyectores PGP 05 y 09. Adicionalmente, un grupo menor se distribuye al N, con tendencias N-S, a lo largo de las trazas LL8. Los sismos inducidos a estas profundidades en el CGP parecen encontrar una barrera en las cercanías de la estructura LR3, que impide su propagación hacia el NW. Esta barrera puede corresponder con el límite estructural entre la depresión indicada por el mínimo gravimétrico y la caldera San Vicente. Mientras que en la zona geotérmica de Borinquen, los sismos se concentraron en dos sectores, en los alrededores del PGB 03 (pozo reinyector), con tendencia NE-SW, y 9 km al NNE, en la intersección de las estructuras LR1 - LR2.

Los eventos sísmicos con profundidades superiores a 4 km, pero menores o iguales a 8 km de profundidad generados por reinyección en PGP 05 y PGP 09 son escasos en el CGP, tienden a concentrarse entre las estructuras LL3 y LL4. En cambio, los sismos inducidos por reinyección en el PGB 3 se concentraron al N-NE en la intersección de las estructuras LR1 y LR2, evidenciando que es un área activa tectónicamente, así como 4 km al W sobre la traza de la LR2.

Los sismos con profundidades mayores a 8 km son escasos, se presentan básicamente como resultado de pruebas de reinyección realizadas en los pozos de Borinque. Principalmente tienden al N-NE, hacia la intersección las estructuras LR1 y LR2.

En adición, el 7 de agosto del 2005, un sismo natural con magnitud local de 3,9 fue registrado en Buenos Aires de Upala (14 km noreste de la zona geotérmica Borinquen, fuera del área de estudio). Dos enjambres alrededor del área de estudio fueron registrados durante este evento, uno cerca del pueblo de Dos Ríos y el otro 8 km oeste de área geotérmica Borinquen, correspondiendo con la actividad tectónica de la estructura LR1 (Fig. 3.6).

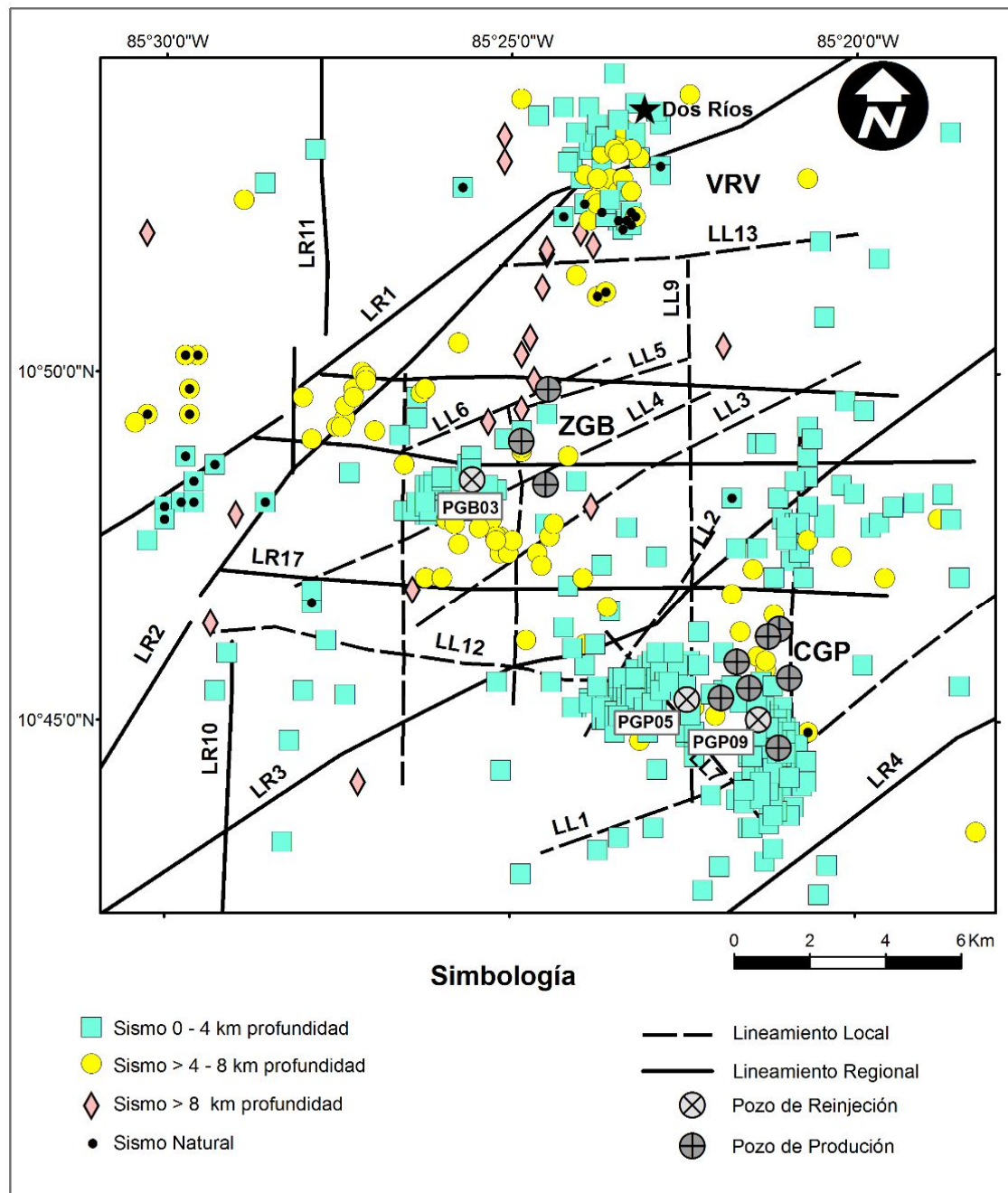


Figura 3.6: Distribución espacial de eventos sísmicos (sismicidad natural e inducida por la reinyección de fluidos geotérmicos en pozos profundos). Los eventos sísmicos son agrupados en tres diferentes familias de acuerdo a su profundidad. VRV – volcán Rincón de la Vieja; CGP – campo geotérmico Las Pailas, ZGB – zona geotérmica Borinquén; LR – Lineamiento regional; LL Lineamiento local.

3.2 El sistema geotérmico Borinquen

En esta etapa la investigación se centra en la falda suroeste del volcán Rincón de la Vieja, donde se intensifican los estudios de exploración en un sector de 31 km², en busca de evidencia que confirme la existencia de los principales elementos que constituyen un sistema geotérmico económicamente explotable. Para lo cual, se recurre a la interpretación de asociaciones mineralógicas secundarias y se evalúa las condiciones termodinámicas del sistema previas a su precipitación. Además, se determinan estructuras geológicas y geoelectricas del medio, distribución del gradiente térmico, y los principales elementos hidrogeológicos responsables de la circulación de fluidos calientes. Finalmente, se analiza la composición química e isotópica de estos fluidos, se define su origen, evolución termodinámica y dirección de flujo.

3.2.1 Mineralogía de alteración

Las asociaciones mineralógicas producto de alteración hidrotermal, son el resultado de los procesos físico-químicos que se llevan a cabo en los minerales primarios y componentes de la roca, provocados al reaccionar con los fluidos geotérmicos tratando de restablecer un equilibrio químico y térmico en el sistema. No obstante, el grado e intensidad de la alteración hidrotermal obedece a diferentes factores que varían en importancia de un lugar a otro dependiendo del marco geológico. Browne (1978), menciona 6 factores: temperatura, presión, tipo de roca, permeabilidad, composición del fluido y duración de la actividad.

En los sistemas hidrotermales activos se genera variedad de minerales secundarios, cuya interpretación es fuente de información invaluable; no obstante, por si solos son menos útiles para determinar las condiciones reinantes del sistema en el momento de su precipitación. Por lo tanto, se seleccionan asociaciones mineralógicas que permiten obtener información de la naturaleza de los fluidos, y condiciones termodinámicas del reservorio geotérmico y capa sello. Por ejemplo, en los pozos geotérmicos de Borinquen, la calcita y el cuarzo son ampliamente distribuidos y estables en un extenso rango de temperatura, por eso no se utilizan como geotermómetros, pero al depositarse con mayor regularidad en espacios abiertos de mineralización, en áreas de ebullición, cambios de presión, son útiles para ubicar el piso de la capa sello, e identificar el techo de zonas permeables. Entre los minerales con rangos de temperatura comúnmente utilizados como geotermómetro en sistemas hidrotermales se encuentra la epidota (Browne ,1978; Browne ,1993; Reyes, 2000). De acuerdo a Reyes (2000), se presenta de forma insipiente desde los 180 °C, cambiando su morfología y abundancia con el incremento de temperatura hasta superar los 280 °C. No obstante, en nuestro contexto geológico al presentarse de forma continua y bien cristalizada se asocia con temperatura mayor o igual a 220 °C, similar comportamiento presenta el leucoxeno.

Por otra parte, en ocasiones los minerales reflejan condiciones diagenéticas que difieren de las relacionadas con el hidrotermalismo asociado con el reservorio geotérmico. Por consiguiente, el análisis se complementa con minerales más susceptibles a los cambios térmicos, tales como los filosilicatos (determinados por medio de difracción de rayos X), que modifican su estructura reticular, para obtener un equilibrio con la temperatura del sistema. De acuerdo a Browne (1978), la montmorillonita se produce aproximadamente hasta 140 °C, la interstratificación de capas de illita/esmectita de 140 °C hasta alrededor de 210 °C y la illita a temperaturas superiores. En los campos geotérmicos de New Zealand la interstratificación de montmorillonita e illita se presenta sobre los 100 °C y hasta 200 °C (Browne, 1993). En el Campo Geotérmico Miravalles (Costa Rica), el porcentaje de illita en la interstratificación montmorillonite/illite varía de 150 °C a 220 °C (Sánchez and Vallejos, 2000).

Actualmente, en el sistema hidrotermal de Borinquen se cuenta con 4 pozos geotérmicos, lo cual impide realizar un análisis bien sustentado que permita relacionar la temperatura y el porcentaje de illita, pero con los datos actuales (análisis difractométricos y perfiles de temperatura estática), se observa un comportamiento similar al determinado en el Campo Geotérmico Miravalles, probablemente por la similitud del ambiente geológico. Esta información permite definir una primera relación de las zonas de alteración del sistema hidrotermal con la temperatura (Tabla 3.3), que se comenta a continuación:

3.2.1.1 Zona de esmectita

Caracterizada por una alta intensidad de alteración, alcanzan en ocasiones hasta el 100 %, está representada por minerales de baja temperatura, dominada principalmente por óxidos de hierro, y minerales arcillosos. Difractométricamente las arcillas pertenecen al grupo de las esmectitas; conforme se profundiza se presenta esmectitas y cloritas (Cl). Los porcentajes de cuarzo (Qz) y calcita (Ca) por lo general son bajos y la mineralogía de alta temperatura está ausente (Fig. 3.7). Esta zona muestra espesores que varían desde 350 m en el PGB 01, hasta 801 m en el PGB 03, y se correlaciona con temperaturas menores o igual a 150 °C (Tabla 3.3, Figs. 3.9b y 3.10).

3.2.1.2 Zona de transición

En la parte superior de esta zona la intensidad de alteración es alta, pero tiende a decrecer con la profundidad, los óxidos de hierro y minerales arcillosos disminuyen. Esta zona es definida por la presencia de interstratificaciones de capas de illita/esmectita en diferentes porcentajes, en menor proporción illita/esmectita y clorita y esporádicamente corrensita. En términos generales, los porcentajes de illita van aumentando y ocasionalmente alcanzan el 100 %, valores relacionados con tramos angostos y aislados, causadas por fluidos laterales en áreas puntuales que no son representativas de un reservorio comercial de alta entalpía. El cuarzo y la calcita, se presentan de forma continua y alcanzan sus mayores porcentajes. El leucoxeno (Le) y la epidota (Ep), se

presentan de forma incipiente en bajos porcentajes (Fig. 3.8). Esta zona exhibe espesores que varían de 296 m en el PGB 05, hasta 1281 m en el PGB 03 (Tabla 3.3, Figs. 3.7b y 3.8). Se correlaciona con temperaturas sobre los 150 °C pero menor a 220 °C.

3.2.1.3 Zona de Illita

En la parte superior de esta zona se presenta iterestratificación de illita/esmectita, además de clorita. Los porcentajes de illita varían de 95 a 100 %; la presencia de epidota y leucoxeno es más constante que la zona anterior, los minerales arcillosos y óxidos decrecen. Al profundizar, los filosilicatos evolucionan a illita y clorita, y posteriormente predomina la clorita, e incrementa la abundancia y tamaño de los cristales de epidota y leucoxeno (Fig. 3.8). Esta zona exhibe un espesor de 1278 m en el PGB-02, no se llegó a perforar la base en ningún pozo. Al suroeste del área explorada (PGB 03), está ausente (Tabla 3.3, Figs. 3.7b y 3.8). Se correlaciona con temperaturas ≥ 220 °C, mientras que se ha medido una temperatura máxima de 277 °C en el PGB 01.

Tabla 3.3: Distribución de las zonas de alteración y espesor por pozo perforado con la temperatura asociada. Prof. - profundidad, Esp. - espesor, NP - no presente.

Zona \ Pozo	01		02		03		05		Temperatura °C
	Prof. m	Esp. m	Prof. m	Esp. m	Prof. m	Esp. m	Prof. m	Esp. m	
Esmectita	0-350	350	0-412	412	0-801	801	0-608	608	$T \leq 150$
Transición	350 - 807	457	412-829	417	801-2083	1282	608-904	296	$150 < T < 220$
Illita	807-2065	1258	829-2107	1278	NP		904-1342	438	$T \geq 220$

El orden de aparición de las zonas de alteración sigue un patrón normal de incremento de la temperatura con la profundidad, donde los minerales de alteración marcan condiciones de temperatura de reservorio a partir del inicio de Zona de Illita, rango que oscila entre -60 y -165 m s.n.m. La isólinea de aparición en forma constante de la epidota relacionada en este contexto geológico con temperaturas del orden de 220 °C, hacia el NE se presenta ligeramente por encima de la zona de illita y de la isoterma de 220 °C (Fig. 3.7b), lo que indica un equilibrio termodinámico entre la roca y el fluido geotérmico. Contrastando, hacia el SW (PGB 03), la epidota mantiene una cota similar, mientras que la isoterma y la zona de illita se profundizan, revelando que este sector se ha enfriado con el tiempo, por lo tanto, la epidota no representa las condiciones térmicas actuales.

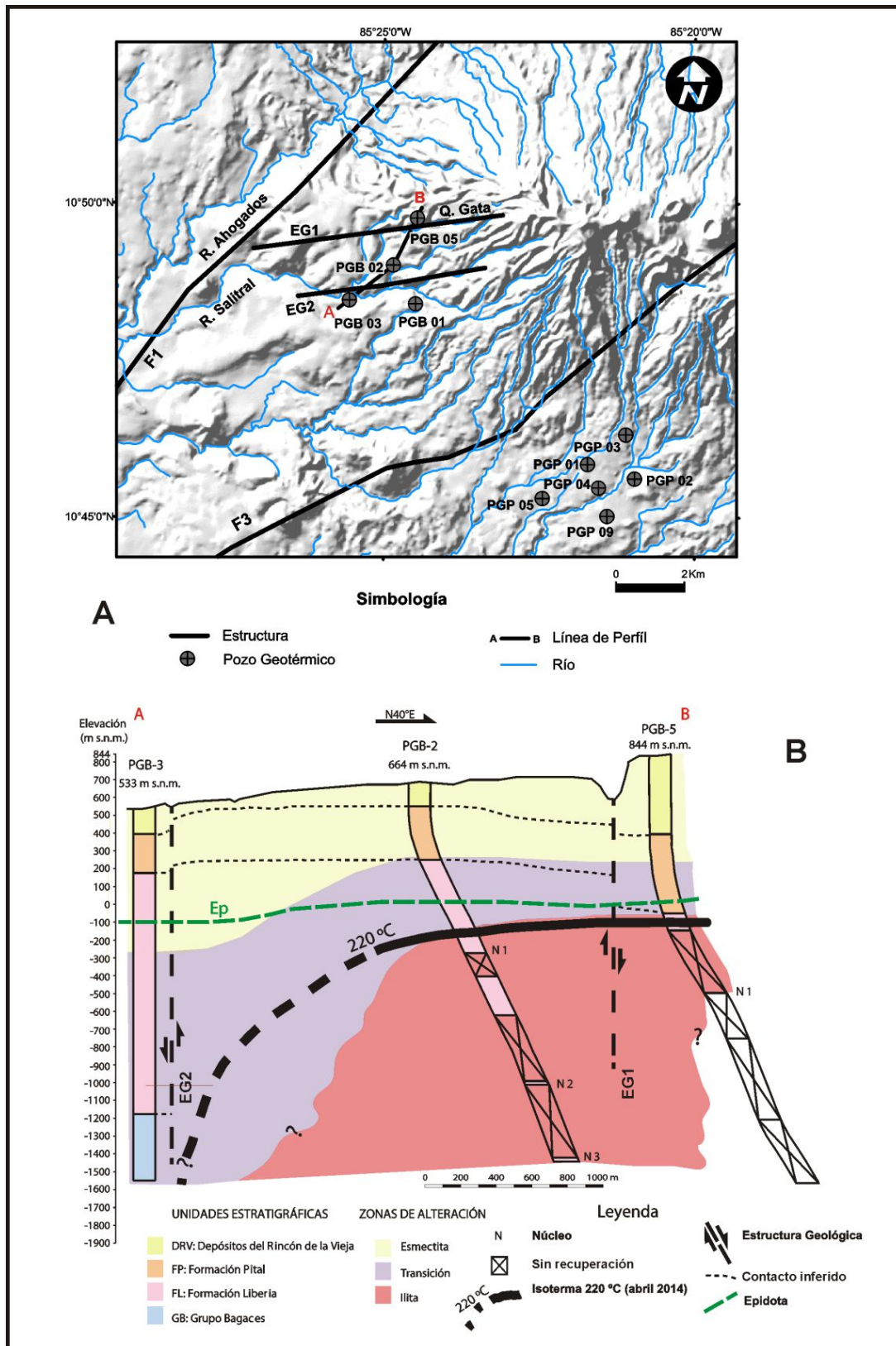


Figura 3.7: (a) Zona geotérmica Borinquen con la distribución de los pozos profundos, estructuras geológicas, línea de perfil y pozos del campo geotérmico Las Pailas. (b) Perfil entre los pozos PGB 03, PGB 02 y PGB 05, donde se muestra la distribución en profundidad de las zonas de alteración mineralógica, la isoterma de 220 °C y la isolínea de aparición de la epidota.

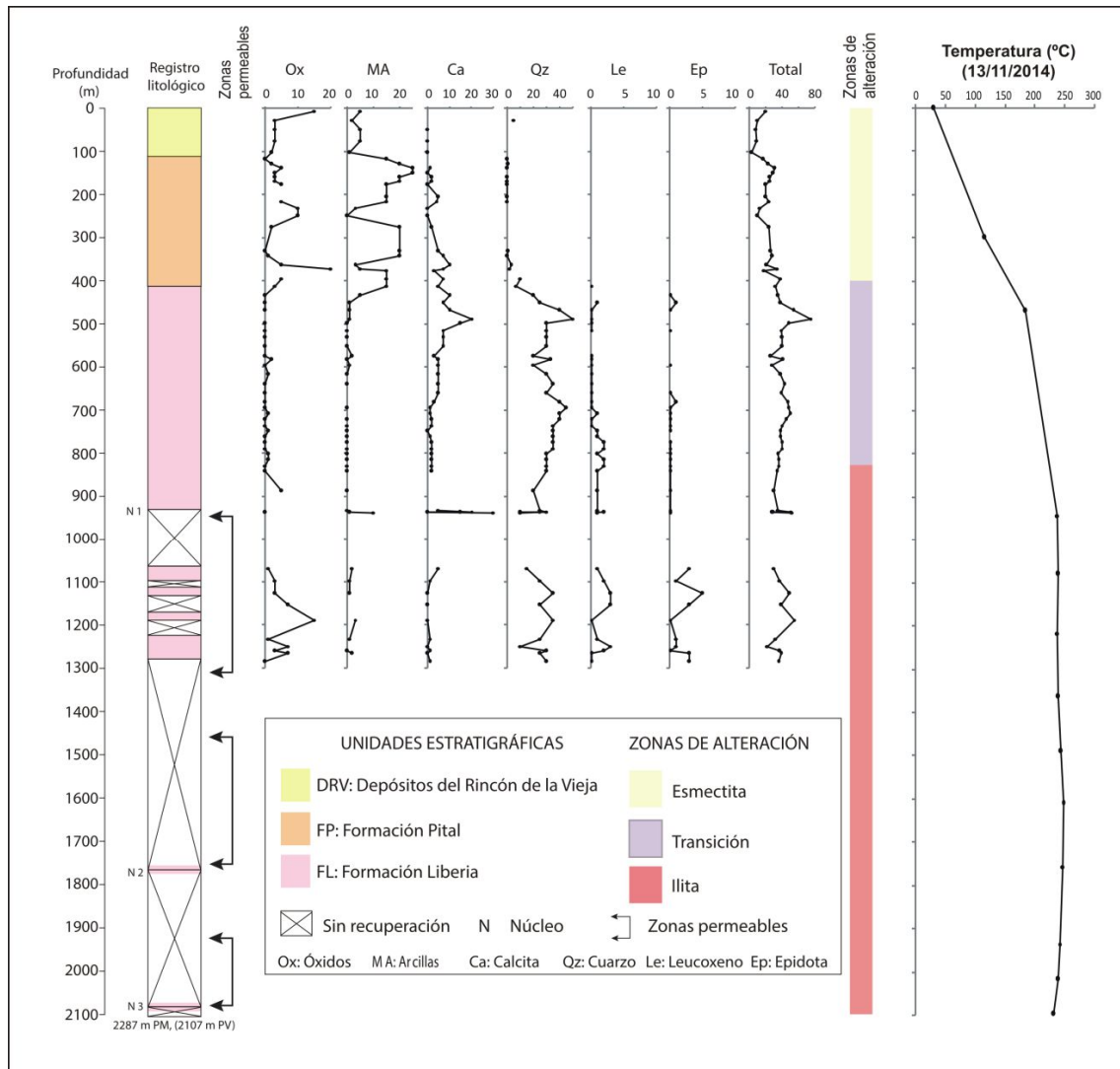


Figura 3.8: Columna litológica del PGB 02, distribución de los minerales de alteración, zonas de alteración y perfil de temperatura estática.

3.2.2 Zonas permeables

Con el propósito de buscar indicios de permeabilidad en profundidad, donde existan condiciones de temperatura de reservorio que evidencien la circulación de fluidos geotérmicos explotables, se reinterpreta las secuencias litológicas obtenidas de los ripios y núcleos de las perforaciones geotérmicas, en conjunto con los parámetros de perforación. Se identifican las zonas de pérdida total de circulación (cuando el sistema de fluidos de perforación pierde un caudal de 50 l/s), pues están relacionadas con zonas permeables, y se determina la profundidad y características de los materiales litológicos. En los pozos realizados hasta el día de hoy, las zonas permeables se presentan principalmente en los niveles de lavas andesíticas y tobas líticas del Grupo Bagaces; mientras que en la Formación Liberia por estar constituida por flujos piroclásticos generalmente masivos, las zonas permeables están asociadas en su mayoría a estructuras geológicas como las detectadas al correlacionar las unidades litológicas entre pozos, que causan el desplazamientos

del orden de 73 m (entre el PGB 02 y PGB 03) y de 300 m (entre el PGB 02 y PGB 05) en el techo de la Formación Liberia, evidenciando dos estructuras geológicas que se han correlacionado con los lineamientos LL6 ubicado sobre la quebrada gata (EG1) y el lineamiento LL4 en el río Salitral (EG2, Fig. 3.7a).

3.2.3 Magnetotelúrica

El método denominado magnetotelúrica (MT) utiliza las variaciones naturales de los campos magnéticos y eléctricos de la tierra, que en buena teoría según Tikhonov (1950), se puede utilizar la comparación de ambos campos (magnético y eléctrico) como un método para explorar la variación de la resistividad de la corteza terrestre con la profundidad. Este método ha sido ampliamente utilizado proporcionando buenos resultados en campos geotérmicos de alta entalpía de origen volcánico, tales como: Nesjavellir en Islandia (Arnason et al. 2000) y Ngatamariki en Nueva Zelanda (Urzúa, 2008). Por ejemplo, en Islandia, en rocas basálticas siempre se observa básicamente la misma estructura resistiva, una capa de baja resistividad en las márgenes externas del reservorio subyacente por un núcleo de mayor resistividad hacia la parte interna (Arnason et al. 2000). Esta estructura geoelectrica es similar a la observada en los campos geotérmicos de Costa Rica como reflejo de los productos de alteración de la roca y la presencia de fluidos hidrotermales. Lo que en buena práctica permite determinar las dimensiones del reservorio geotérmico. Por otra parte, una de las principales ventajas del MT es la capacidad para definir anomalías geoelectricas en profundidad, que podrían estar asociadas a estructuras geológicas que afectan el reservorio geotérmico; lo cual es de suma importancia en la exploración y desarrollo de campos geotérmicos.

Con base en el modelo de inversión de la resistividad en tres dimensiones (West JEC, 2011), utilizando la resistividad aparente en el área explorada de Borinquen, se distinguen cuatro capas que se analizan y correlacionan con la mineralogía de alteración: la más superficial con resistividades que oscilan entre 4 y 75 ohm-m, sobreyace la capa con valores menores a 10 ohm-m, profundizando en el sistema aparece la tercera capa con resistividades intermedias entre 10 y 40 ohm-m, y la capa más profunda muestra valores superiores a los 40 ohm-m.

El amplio rango de resistividad de la capa más superficial, se debe a la existencia de roca fresca, así como, alteración de baja temperatura, diferentes niveles de compactación y contenidos de humedad, esta capa se extiende hasta los primeros 100 m. La capa con valores menores a 10 ohm-m, inicia su aparición a 150 m de profundidad (notable en el mapa de 500 m de profundidad, Fig. 3.9), y se extiende hasta los 800 m de profundidad, refleja la abundancia de arcillas de la familia de la esmectita. Estas dos capas constituyen la mayor parte de la capa sello del sistema geotérmico.

La zona con resistividades intermedias entre 10 y 40 ohm-m, se extiende desde los 900 m hasta los 1100 m de profundidad, conforme se profundiza estos valores se desplazan hacia las zonas periféricas, mientras que en la parte central se presentan resistividades con valores mayores a 40 ohm-m (mapa de 1350 m, Fig. 3.9). Esta zona de mayor resistividad está relacionada con las partes más calientes del sistema. Debido a que la matriz de la roca es mucho menos conductiva que la saturación del fluido, causado por los productos de alteración que dominan esta zona de mineralización que son de baja conductividad (illita, clorita, illita/esmectita, epidota, etc.).

La distribución de la resistividad, además, permite distinguir ocho lineamientos resistivos (LΩ) que podrían estar asociados a zonas fracturadas a lo largo de fallas por donde circula fluido, o con cambios de permeabilidad que conforman barreras hidrogeológicas (Fig. 3.9). Los lineamientos resistivos LΩ1 (NE-SW), LΩ2 y LΩ3 (NW-SE) son más evidentes, marcados por cambios abruptos del gradiente resistivo. Mientras que, los lineamientos resistivos LΩ4 y LΩ5 (ENE – WSW) por gradientes menos pronunciados; LΩ6, LΩ 7 (E-W) y LΩ8 (ENE-WSW) por inflexiones en las curvas de iso-resistividad.

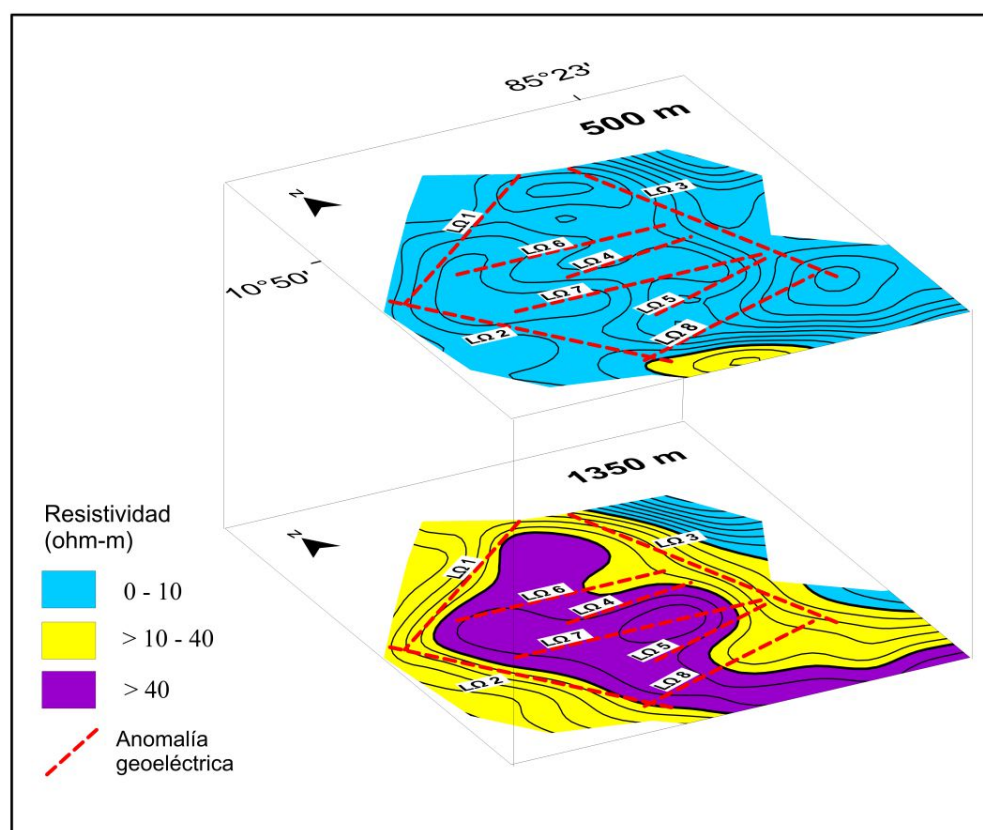


Figura 3.9: Distribución de la resistividad a 500 m y 1350 m de profundidad y lineamientos resistivos, obtenidos del modelo de inversión en tres dimensiones (modificado de West JEC, 2011).

3.2.4 Manifestaciones Termales

Una de las principales evidencias de la existencia de un sistema hidrotermal es la presencia de manifestaciones termales, pues, cuanto mayor es el aporte de calor natural en la parte inferior de los sistemas, mayor es el flujo ascendente de fluido, y mayor será la descargar de calor hacia la superficie, y si el medio lo permite, se harán presentes las manifestaciones termales en el terreno.

En el área de estudio, existen diferentes tipos de manifestaciones termales: fumarolas, roca silicificada, suelos y manantiales calientes; con temperaturas que varían desde ambiente hasta el punto de ebullición (24 – 97 °C) y pH's que oscilan de ácidos a neutros (2,40 – 7,57). Las Fumarolas se ubican en diferentes puntos del área de estudio entre los 560 y 900 m s.n.m. (Fig. 3.10), en los alrededores de las nacientes del río Colorado (Manifestaciones Termales Las Pailas, MLP), en la naciente de la quebrada Zanja Tapada (Manifestaciones Termales Las Hornillas, MLH), en el Río Salitral y quebrada Gata (Manifestaciones Termales Borinquen, MB); se caracterizan por la constante salida de gases, temperaturas del orden de 98 °C y difundida alteración argilítica. En ocasiones la salida de gas no es constante pero el suelo y la roca muestran temperaturas hasta de 88 °C, con intensa alteración arcillosa, junto con sílice y azufre. Otra clase de manifestación son los cráteres, se aprecian en la parte alta del edificio volcánico; además, en MLP tres lagunas con diámetros desde 35 hasta 90 m, y temperaturas del orden de 86 °C., son pequeños cráteres producto de erupciones freáticas. Los manantiales calientes se presentan distribuidos en toda el área, con temperaturas que oscilan entre 31 y 91 °C; por lo general consisten en aguas superficiales con poco tiempo de residencia, calentadas por vapor; estas manifestaciones son de utilidad para observaciones hidrogeológicas y estructurales. Por otra parte, las manifestaciones fósiles se ubican más alejadas del macizo volcánico y ayudan a dimensionar la extensión del sistema hidrotermal.

La importancia del análisis de las manifestaciones hidrotermales radica en que, conforme los fluidos se alejan de la fuente de calor e incrementa el tiempo de residencia, se generan procesos termodinámicos y químicos que inducen un equilibrio fluido – roca, (generando un auto sellamiento), la temperatura del fluido disminuye, el pH incrementa y su composición se torna Sodio Clorurada. Cuando alguna estructura o zona de fracturas intercepta esta clase de fluido y alcanzan la superficie, se denomina salida del reservorio geotérmico (“out flow”), de acuerdo a Giggenbach (1988), se cataloga como “agua madura”. Por lo tanto, se torna de suma importancia analizar la composición química e isotópica (sección más adelante), pues acarrea información adquirida durante el recorrido de los fluidos en el subsuelo, que en conjunto con las muestras provenientes de los pozos y nacientes meteóricas ayudan a dilucidar el origen, temperatura y composición de los fluidos que constituyen el sistema geotérmico y explicar procesos hidrológicos e hidrogeológicos que se llevan a cabo en el área.

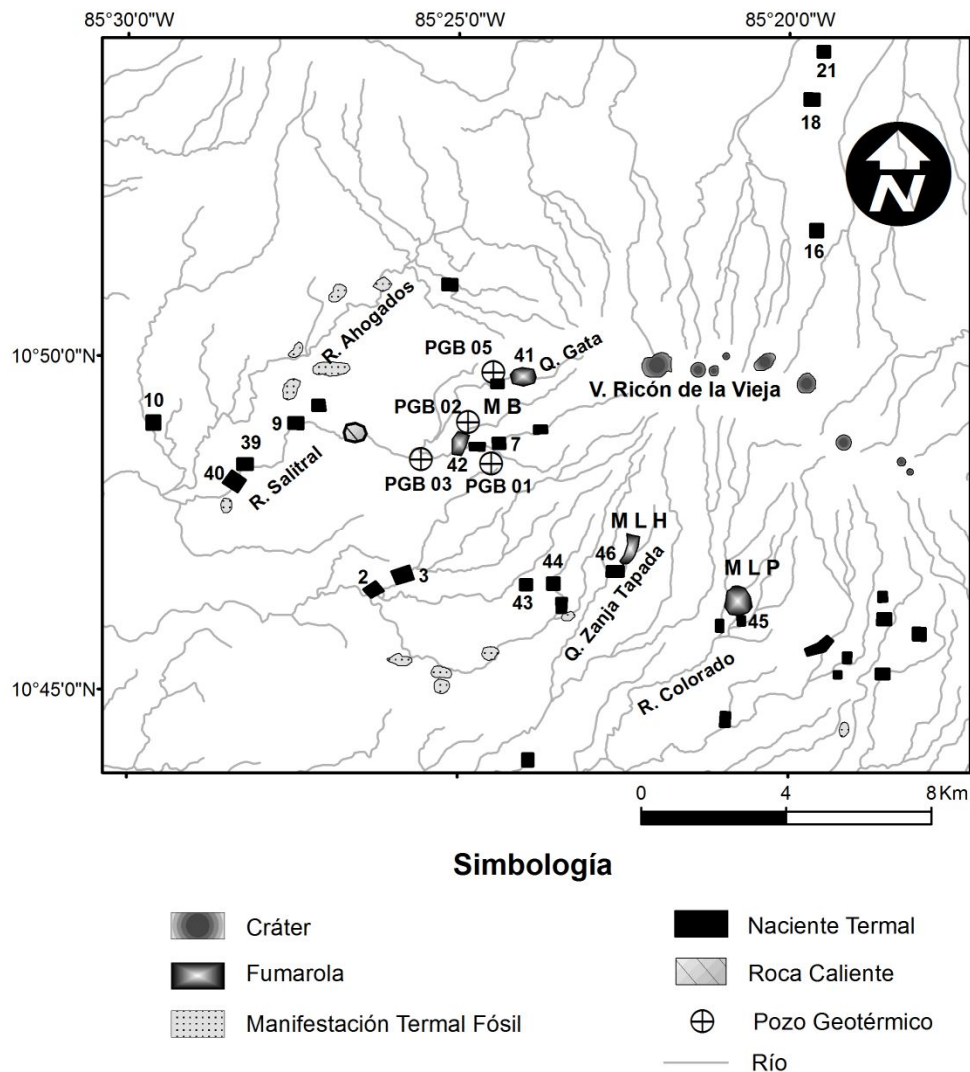


Figura 3.10: distribución de las principales manifestaciones termales. MLP – manifestaciones termales Las Pailas, MLH - manifestaciones termales Las Hornillas y MB - manifestaciones termales Borinquen.

3.2.5 Hidrogeoquímica

En este apartado se analizan 16 muestras provenientes de manifestaciones hidrotermales y 4 de pozos geotérmicos de Borinquen. Con base en la concentración de los aniones SO_4 , Cl y HCO_3 , utilizando el diagrama ternario de Piper, se identifican tres tipos de aguas (Fig. 3.11a, Tabla 3.4):

Sulfatadas: presentan pHs de 2,40 hasta 5,43 y temperaturas que oscilan entre 57 y 97 °C. Esta clase de aguas provienen de fumarolas o cerca de ellas, topográficamente varían de 560 a 900 m s.n.m. Son aguas inmaduras que no han tenido el tiempo de residencia suficiente para alcanzar un equilibrio químico con la roca. Se originan como resultado de la interacción de agua subterránea con alto contenido de oxígeno reacciona con H_2S de origen magmático, se oxida y forma SO_4 . En el contexto del sistema hidrotermal se asocian a zonas de ascenso de fluido, sin presentar relación directa con un reservorio geotérmico de alta entalpía.

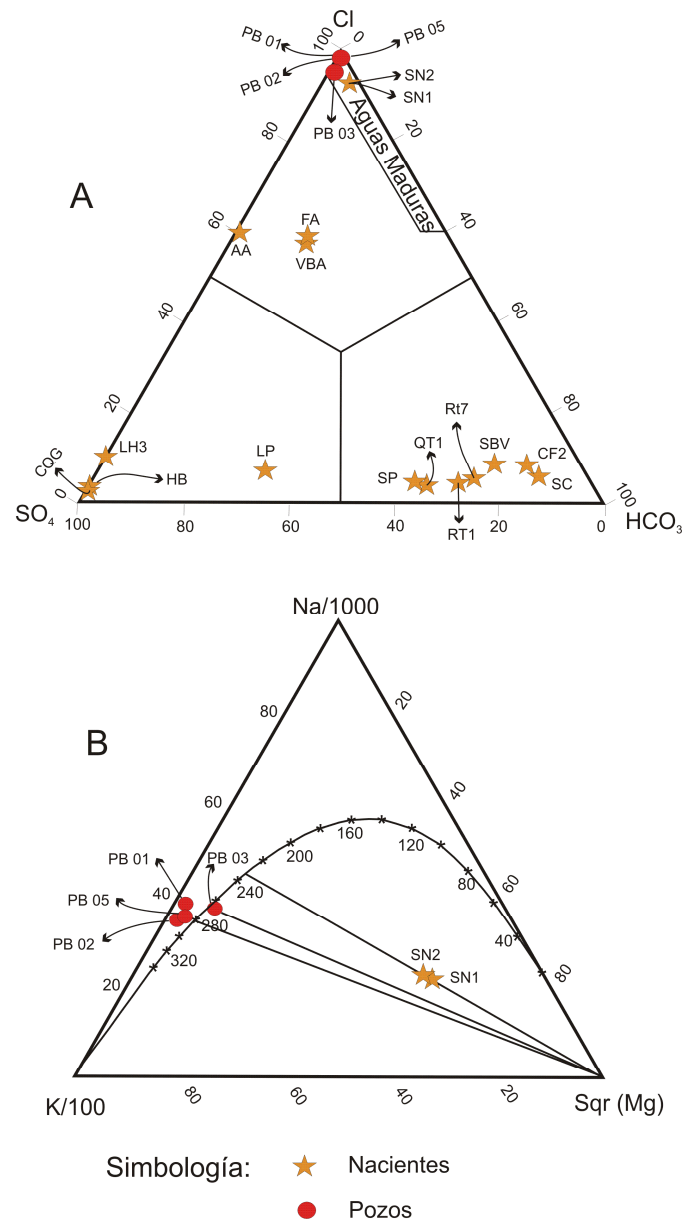


Figura 3.11: (a) diagrama de Piper en el que se utiliza la concentración relativa de los aniones SO₄, Cl y HCO₃, para clasificar las aguas. (b) diagrama Na-K-Mg con la línea de equilibrio total de Giggemback (1988), utilizado como geotermómetro para definir la temperatura de equilibrio de las muestras de agua sodio cloruradas provenientes de los pozos profundos de Borinquen y de las manifestaciones hidrotermales Salitral Norte.

Bicarbonatadas: presentan pHs ligeramente ácidos a neutros (5,00 – 7,57) y temperaturas que oscilan entre 30,5 y 50,0 °C, provenientes de manantiales calientes ubicados entre los 276 y 630 m s.n.m. Esta clase de agua está constituida por acuíferos someros con poco tiempo de residencia en el subsuelo (las concentraciones de Mg oscilan entre 4,8 y 65,0 mg/L), calentada o mezclada con la condensación de vapor, sin relación con un yacimiento geotérmico.

Cloruradas: presenta pHs ligeramente ácidos a neutros (4,01 – 6,43), y temperaturas que oscilan entre 36,6 y 73,0 °C, provienen de manantiales calientes que se ubican entre los 259 y 270 del

lado pacífico y de 410 a 740 m s.n.m en la vertiente Caribe. Las muestras de las nacientes Salitral Norte SN 1 y SN 2 (39 y 40, Fig. 3.10), y las obtenidas de los pozos geotérmicos PGB 01, PGB 02, PGB 03 y PGB 05 (PB 01, PB 02, PB 03, y PB 05) presentan una posición similar en el diagrama de Piper, en el sector de aguas maduras (Fig. 3.11a). Además, por sus concentraciones de Na, K y Mg (Fig. 3.11b), se determina que las aguas de las nacientes SN han alcanzado un equilibrio con la roca, a una temperatura cercana a los 235 °C, datos que sugieren su relación con un reservorio de alta entalpía. Por otra parte, las muestras de los pozos geotérmicos de Borinquen indican temperaturas del orden de 280 °C, dato que es consistente con la temperatura máxima medida de forma directa en el PGB 01 (277 °C).

Al comparar la relación Cl/B y asumiendo que estos elementos son de origen magmático y conservativos, y considerando que durante el levantamiento geológico, y las perforaciones geotérmicas no hubo indicios de rocas sedimentarias de origen marino que aporten al sistema B y Cl; una vez en la fase líquida la concentración de estos elementos se ve afectada únicamente por diluciones o concentraciones y no por equilibrios químicos. Bajo esta premisa, la relación Cl/B permite deducir que las nacientes de Salitral Norte (SN1 97,9 y SN2 95,5) y las muestras obtenidas de los PGB 01, PGB 02 y PGB 05, (102,6, 105,6 y 101,9) podrían tener un parentesco, no así las provenientes del PGB 03 (79,6).

3. Resultados

Tabla 3.4: Análisis químicos de manifestaciones hidrotermales y pozos geotérmicos de Borinquen y clasificación del tipo de agua con base en la concentración de los aniones SO₄, Cl y HCO₃. Temp. - Temperatura, Cond. Lab – Conductividad de laboratorio.

Ubicación		Código	Elevación.	Temp.	pH	Cond. Lab	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²	B	Cl ⁻	SO ₄ ⁼	HCO ₃ ⁻	STD	Tipo
	En Fig. 5		m s n m	°C	Lab.	μS/cm ²	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	ppm	ppm	ppm	mg/L	
Río Tizate 7	3	RT 7	350	35	6,9	444	39,8	9,8	28,3	15,0		9,2	48,0	206,0	381	HCO3
Río Tizate 1	2	RT 1	330	40	7,1	447	42,0	8,1	27,5	14,8		6,3	56,0	201,0	387	HCO3
Spa Buena Vista	7	SBV	630	47	7,6	332	28,3	4,8	27,8	7,9		10,0	26,0	153,0	259	HCO3
Cerro Fortuna 2	9	CF2	363	39	7,1	155	9,2	4,5	12,9	4,8		4,0	7,2	73,0	153	HCO3
Salitral Norte	39	SN 1	270	69	6,4	9180	1617,0	159,0	191,0	17,5	31	3035,0	67,0	280,0	5565	Cl
Salitral Norte	40	SN2	259	73	6,4	9420	1663,0	164,0	195,0	16,7	31	2960,0	68,0	265,0	5675	Cl
Naciente Santa Clara	10	SC	276	31	6,0	532	35,0	6,0	47,0	21,0		12,0	25,0	300,0	423	HCO3
Fumarola Quebrada Gata	41	CQG	900	97	2,8	1525	116,0	31,0	27,0	5,9		10,1	495,0	0,0		SO4
Hotel Borinquen	42	HB	560	96	3,0	1250	19,0	12,0	55,0	22,0		6,8	422,0	nd	958	SO4
Sitio Pilón	43	SP	622	50	6,0	2070	113,0	35,0	106,0	65,0		21,0	270,0	624,0	7134	HCO3
Quebrada Tibio	44	QT1	620	35	5,0	1252	95,0	28,6	47,0	55,0		18,1	217,0	561,0	966	HCO3
PGB-01	PGB 01	PB 01	699		7,7	18535	3681,0	628,0	162,0	<0,1	63	6445,0	40,5	5,7	12460	CL
PGB-02	PGB 02	PB 02	699		7,8	21500	4188,0	818,0	177,0	<0,1	69	7276,0	30,5	8,8	14540	CL
PGB-03	PGB 03	PB 03	533		7,2	7370	1229,0	189,0	221,6	0,1	29	2307,0	111,0	44,0	4530	CL
PGB-05	PGB 05	PB 05	844		7,6	17238	3386,0	593,0	166,0	0,1	57	5810,0	46,0	9,0	11400	CL
Hostel Agroecológico	16	AA	740	36	4,0	1550	61,4	9,0	142,0	49,3		314,0	284,0	1,0	1202	CL
Familia Araya	18	FA	435	56	6,5	5880	361,0	122,0	433,0	310,0		1374,0	866,0	578,0	4861	Cl
El Volcancito B. Aires	21	VBA	410	61	6,4	6100	331,0	128,0	400,0	330,0		1396,0	916,0	599,0	5102	Cl
Las Pailas	45	LP	763	57	5,4	154	5,4	1,8	11,8	5,4		3,3	38,0	25,0	162	SO4
Las Hornillas	46	LH3	770	93	2,4	2570	31,9	11,0	50,6	19,0		62,0	757,0	nd	1526	SO4

3.2.6 Gradiente térmico

Con el fin de identificar y evaluar la magnitud y distribución espacial de la anomalía de calor, se utilizó perfiles térmicos de 17 pozos con profundidades que oscilan entre 300 y 670 m, distribuidos en un área aproximada de 31 km², donde los valores varían desde 6 °C/100 m (PBr-28 ubicado al NW) hasta 56 °C/100 m (PBr-7 al Sur). Con ellos se ha modelado la distribución espacial de las curvas de isogrado térmico y trazado lo que se ha denominado lineamientos térmicos (LT), áreas preferenciales que regulan el paso del calor (Tabla 3.5, Fig. 3.12).

Tabla 3.5: Datos de las perforaciones utilizadas para determinar la distribución del gradiente térmico en la zona geotérmica Borinquén.

Localización de pozo Fig. 3.12	Elevación m s.n.m.	Profundidad m	Temperatura. Max °C	Gradiente Térmico °C/100
PBr-6	545	360	93	21
PBr-7	602	320	198	56
PBr-8	704	510	202	49
PBr-9	770	405	135	39
PBr-10	512	340	67	16
PBr-11	605	340	58	19
PBr-12	589	560	148	27
PBr-13	605	380	130	43
PBr-14	472	550	118	19
PBr-15	551	540	123	30
PBr-16	859	510	121	24
PBr-17	785	420	111	35
PBr-21	845	527	144	48
PBr-22	691	300	76	48
PBr-23	560	505	89	14
PBr-25	580	670	207	43
PBr-28	414	640	61	6

El sector que exhibe mayor gradiente térmico se ubica en los alrededores del PBr-7, área donde el pozo geotérmico PGB 01 alcanzó una temperatura máxima de 277 °C a 2570 m de profundidad. En este punto, la anomalía térmica parece estar relacionada con una pluma de calor ascendente, evidenciada en superficie por diversas manifestaciones termales que alcanzan el punto de ebullición. Presenta un lineamiento térmico orientado a grosso modo NNW-SSE (LT1), con un gradiente que decrece rápidamente hacia el W (LT2), indicando un medio menos permeable hacia dicho sector, tal y como se comprobó en el PGB 03, perforación en la cual se midió una temperatura de 210 °C a 2082 m de profundidad y un índice de inyectabilidad bajo (1,5 l/s*bar). Hacia la parte central del área explorada, las curvas de isogrado se estrechan indicando un cambio de permeabilidad en el medio.

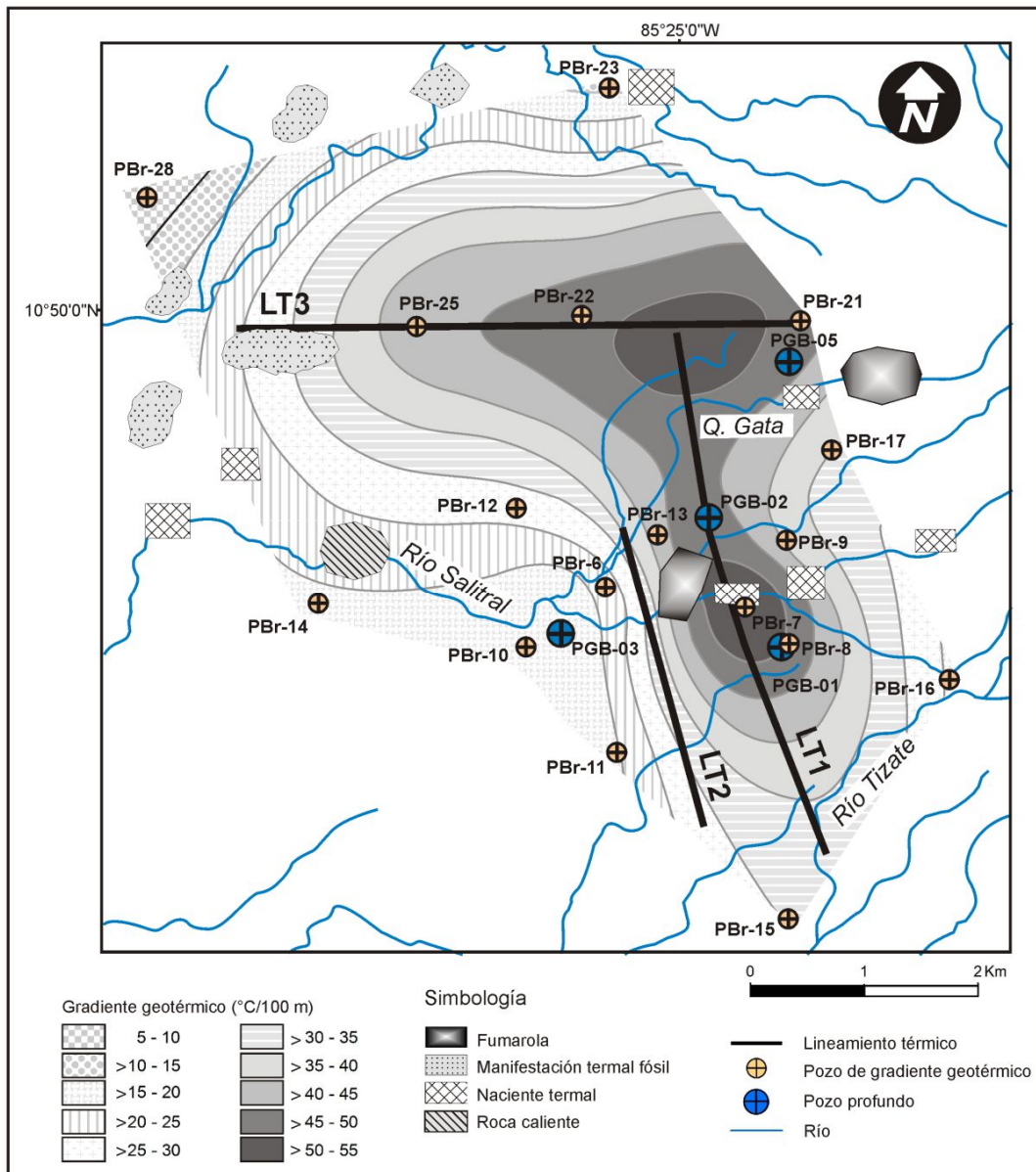


Figura 3.12: Mapa de distribución de gradiente térmico, manifestaciones termales, y lineamientos térmicos, realizado con base en los perfiles de temperatura de 17 pozos.

La anomalía térmica se extiende hacia el N, donde se abre abarcando una mayor área, adopta una orientación E-W (LT3). Hacia el N y W, el gradiente térmico decrece, pero la separación de las curvas indica una buena transferencia de calor, probablemente relacionadas con permeabilidad que facilita el paso del fluido. Igualmente sucede hacia el sur, dirección donde el gradiente térmico decrece paulatinamente a lo largo del LT1.

Esta configuración permite hipotizar que el área está afectada por una fuente de calor, donde los fluidos calientes además de aprovechar la permeabilidad inherente en la roca, utilizan la permeabilidad generada por la estructura E-W, que facilita el paso de los fluidos geotérmicos. De igual forma, la pluma de calor detectada en los alrededores del PGB 01, corresponde a un

ascenso de fluido del sistema geotérmico, ambos sectores parecen estar influenciados por una fuente de calor relacionada con el volcán activo Rincón de la Vieja. Mientras que el gradiente medido en los alrededores del PGB 03, probablemente refleje el efecto de una fuente de calor antigua, instaurada en el área, posiblemente durante el colapso de la CCD hace 1,43 Ma.

3.2.7 Isótopos estables Deuterio y Oxígeno 18 (δD y $\delta^{18}O$)

Para complementar el estudio hidrogeoquímico y lograr un mayor conocimiento de los fluidos que constituyen el sistema hidrotermal, se utilizan datos de isótopos estables de oxígeno 18 y deuterio ($\delta^{18}O$ y δD) provenientes de: pozos geotérmicos de Borinquen y Las Pailas, nacientes de agua meteórica y termal, así como de la estación meteorológica Monte Galán (operated station in Costa Rica by the International Atomic Energy Association/World Meteorological Organization as part of Global Network for Isotopes in precipitation, Lachniet and Patterson, 2002).

La distribución del δD de agua meteórica con respecto a la altura en la vertiente Pacífica, entre las cotas 55 y 1790 m s.n.m. (Figs. 3.13a y b), presenta dos tendencias particulares, lo que sugiere la influencia de dos tipos de agua meteórica. De 55 a 235 m s.n.m, se observa una distribución normal de la concentración del D causado por el efecto local de altura, pues, a mayor elevación los valores de este isótopo decrecen. Caso contrario se observa entre los 715 y 1790 m s.n.m., a estas elevaciones las concentraciones de D incrementan con respecto a la altura, al punto que, los valores medidos en la estación Monte Galán, ubicada a 6 km de la costa pacífica y 60 m s.n.m, coinciden con valores correspondientes a 1150 m s.n.m.

Por otra parte, con el fin de corroborar o descartar la relación entre el agua meteórica y los fluidos del sistema hidrotermal, se analiza la correlación de las concentraciones de los isótopos estables ($\delta^{18}O$ vs δD). Para realizar este estudio se grafican las nacientes de agua meteórica (sin efecto térmico), y se agrega en el diagrama la línea meteórica para Costa Rica (LMCR) $\delta D = 7,6\delta^{18}O + 10,5$, ($r^2 = 0,96$, $n = 66$) definida por Lachniet y Patterson (2002); pero, por exhibir poca afinidad con los datos locales, ya que esta línea fue establecida para todo el país, se determina la ecuación de la línea de mejor ajuste por medio de mínimos cuadrados utilizando las nacientes de agua meteórica ($\delta D = 9,16\delta^{18}O + 17,95$, $r^2 = 9,88$, $n = 18$), y para efectos del trabajo se adopta como línea meteórica local (LML, Fig. 3.14).

3. Resultados

Tabla 3.6: Datos de isotopos estables $\delta^{18}\text{O}$ y δD de los pozos geotérmicos (Borinquen y Las Pailas), nacientes de agua meteórica y termal, y de la estación meteorológica Monte Galán.

Sitio de muestreo	Ubicación Fig. 3.13b	Código	Altitud m s.n.m.	Temp. °C	$\delta^{18}\text{O}$ ‰	δD ‰
Naciente Río Tizate	1	NRT	1790	15	-3,29	-11,73
Termal Río Tizate 1	2	RT1	330	40	-7,83	-53,22
Termal Río Tizate 7	3	RT7	550	35	-7,91	-53,43
Naciente Quebrada Gata	4	NQG	1330	17	-5,33	-29,11
Naciente Quebrada Pacayal	5	NQP	1015	18	-6,56	-41,07
Naciente Hotel Borinquen	6	NHB	745	25	-7,31	-48,27
Termal Spa Buena Vista	7	TSBV	630	47	-7,69	-52,08
Termal cerro Fortuna 2	9	TCF2	363	39	-7,39	-50,71
Termal Santa Clara	10	NSC	276	31	-7,32	-49,17
Naciente Buena Vista	11	NBV	235	21	-7,66	-54,00
Cerro Atravezado 1	12	AT1	195	21	-7,37	-50,95
Vado La Esperanza 1	13	VE1	55	26	-6,43	-46,13
Laguna Jilgueros	14	LJ	1560	19	-3,96	-16,34
Naciente Río Azul	15	NRA	1760	16	-3,96	-17,86
Termal Agroecológico Hostel	16	TAA	740	36	-4,78	-26,74
Agroecológico Hostel Acueducto	17	AAT	748	28	-4,65	-25,94
Termal Familia Araya	18	TFA	435	56	-4,83	-26,45
Naciente Los Araya	19	NLA	475	25	-5,19	-32,34
Naciente Acueducto Dos Ríos	20	ADR	600	22	-4,81	-26,68
El Volcancito Buenos Aires	21	VBA	410	61	-4,84	-28,15
Naciente Araya	22	NPA	440	25	-4,42	-23,70
Naciente Río Salto	23	NRS	980	20	-6,51	-40,65
Termal Río Salto (lado izquierdo)	24	TRS	730	33	-6,15	-36,71
Naciente Río Zopilote	25	NRZ	1320	17	-4,80	-25,75
Pailas -Santa María (agua fría)	26	PSM	916	20	-6,44	-40,10
Termal Río Negro (tributario)	27	TRN	760	38	-5,73	-32,86
Termal Santa María	28	TSM	767	38	-5,23	-28,43
Termal Azufrales	29	TAZ	698	44	-5,47	-29,50
Naciente Quebrada Yugo	30	NQY	785	23	-6,21	-37,48
Naciente Acueducto Hotel Guachipelin	32	NAG	595	27	-7,51	-50,27
Quebrada Agua Escondida	33	PAE	785	21	-5,43	-30,84
Naciente Río Blanco (lado derecho)	34	NRB	1440	18	-4,81	-26,55
Naciente Río Colorado	35	NRC	1485	17	-4,67	-25,37
Monte Galán	37	MG	60		-6,00	-37,00
Las Hornillas Rincón de la Vieja 4	38	LH4	751	88	-7,30	-50,90
Salitral Norte 1	39	SN1	270	69	-5,41	-42,68
Salitral Norte 2	40	SN2	259	73	-5,68	-43,95
Las Pailas	45	LP	763	57	-6,01	-36,90
PGB-01 FP 2000 m	PGB-01		669		-3,87	-40,40
PGB-01	PGB-01		669		-4,70	-43,50
PGB-01 FP 1000 m	PGB-01		669		-4,18	-42,20
PGB-02	PGB-02		664		-3,98	-39,53
PGP-02					-3,21	-30,79
PGP-01 agua separada					-3,31	-31,39
PGP-03					-3,71	-31,66
PGP-04					-4,01	-33,40

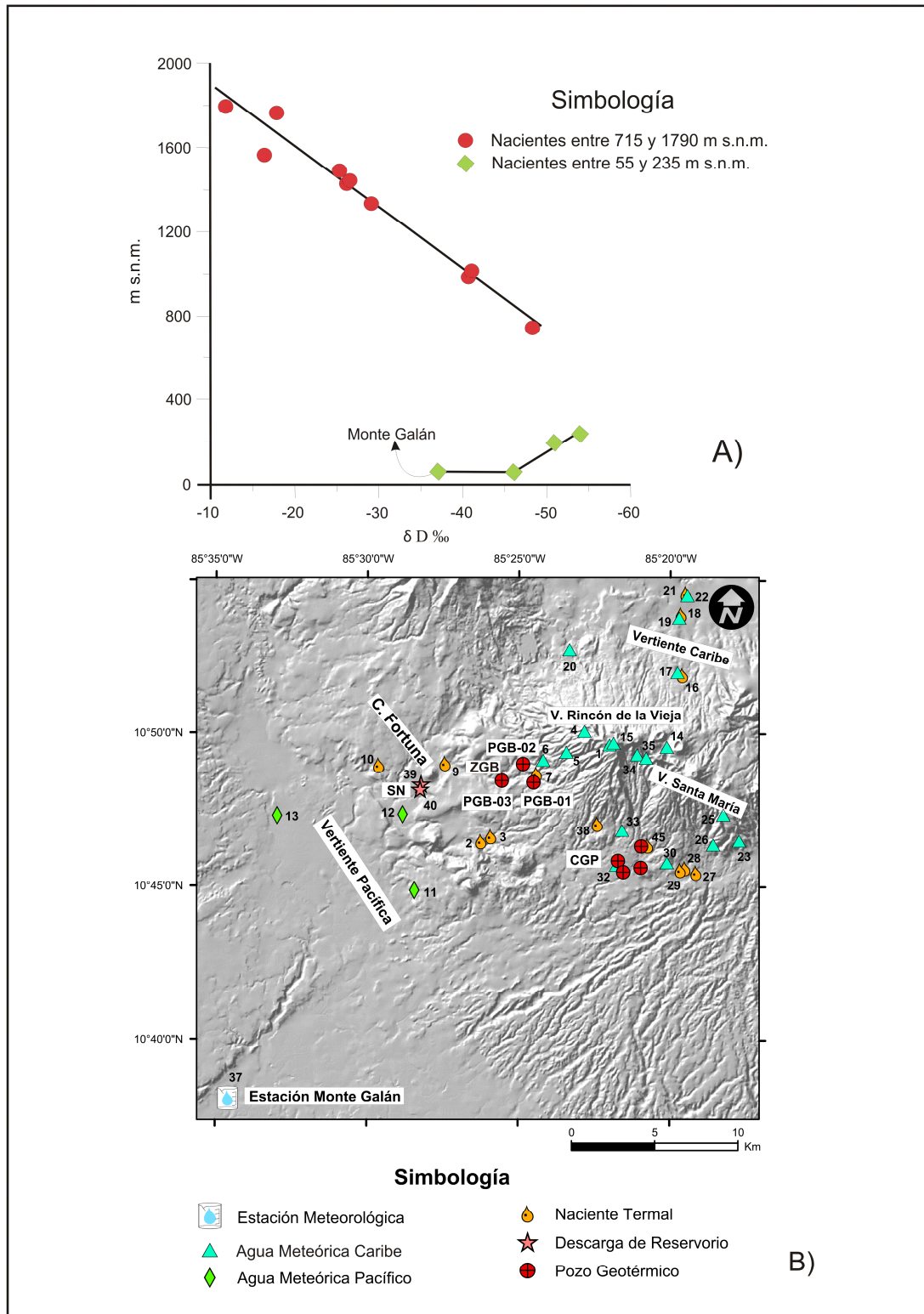


Figura 3.13: (a) distribución del Deuterio con respecto a la altura en la vertiente Pacífica, entre las cotas 55 y 1790 m s.n.m. (b) Distribución espacial de las muestras de agua meteórica, nacientes termales, pozos geotérmicos y estación Monte Galán.

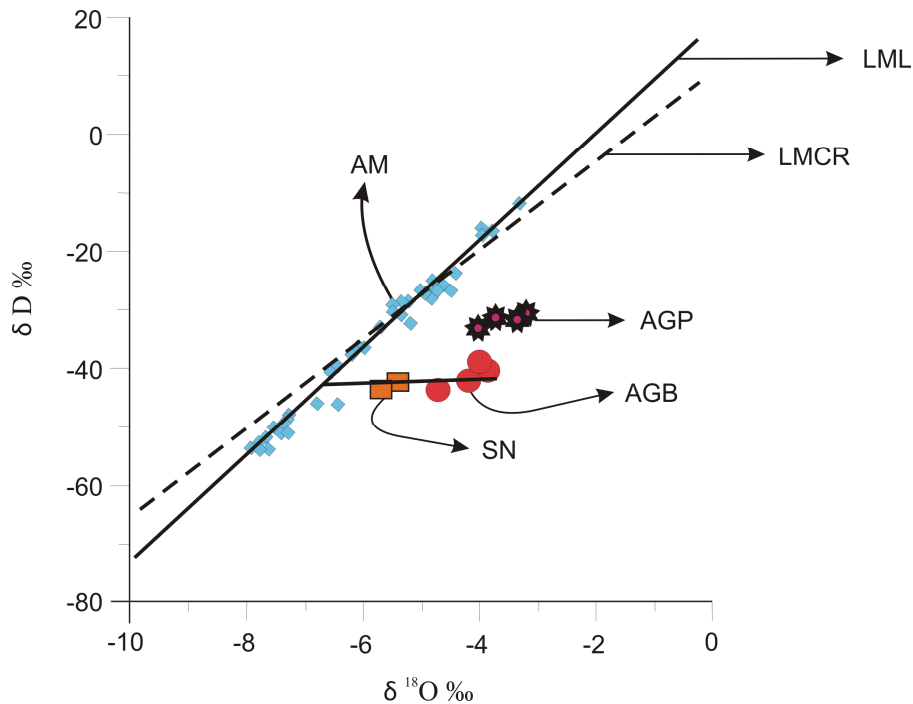


Figura 3.14: Correlación de $\delta^{18}\text{O}$ y δD de muestras de pozos geotérmicos de Las Pailas y Borinquen (AGP y AGB), nacientes termales Salitral Norte (SN) y meteóricas (AM). Además, se muestra la línea meteórica determinada para Costa Rica (LMCR) y la línea meteórica local (LML).

Al incluir en el análisis los datos isotópicos ($\delta^{18}\text{O}$ y δD) de muestras con influencia termal (manifestaciones hidrotermales y pozos geotérmicos de Las Pailas y Borinquen), se determina que, el fluido proveniente de los pozos de Borinquen está compuesto por isótopos más livianos con respecto al agua del reservorio del CGP, revelando que son dos sistemas independientes. Por otra parte, entre las muestras provenientes de los pozos PGB 01 y PGB 02 y las nacientes termales Salitral Norte (SN1 y SN2), se vislumbra un parentesco, pues se asocian en una línea de dilución, confirmando que estas manifestaciones son una descarga de un reservorio geotérmico ubicado en la zona geotérmica Borinquen (Fig. 3.16).

3.3 Estrategia inicial de desarrollo para la zona geotérmica Borinquen

Considerando que la estrategia inicial de desarrollo es la base del éxito del futuro campo geotérmico, esta se debe diseñar de forma que sea lo más flexible y eficiente posible, que permita hacer ajustes y cambios durante su ejecución, para optimizar los recursos y disminuir los impactos negativos sin perder de vista los objetivos. La zona geotérmica Borinquen presenta diferentes factores que dificultan y encarecen el desarrollo del proyecto: difícil acceso, topografía irregular, red hídrica con cauces profundos, alta plusvalía por ser una zona turística y ambientalmente sensible por colindar con el Parque Nacional Rincón de la Vieja (patrimonio de la humanidad). Por consiguiente, se plantea desarrollar la zona geotérmica Borinquen utilizando perforación direccional, técnica que por su versatilidad permite construir varios pozos desde una misma plataforma, lo cual conlleva a reducir el terreno requerido, al tiempo que disminuye la infraestructura en superficie, rutas de acceso, tuberías, alcantarillado, etc. y su respectivo mantenimiento; lo anterior se refleja en reducción de costos y un menor impacto ambiental.

En esta sección se plantea y aplica una metodología para organizar, sintetizar e integrar la información derivada de diversos estudios geocientíficos que brinden información del reservorio geotérmico (dimensiones, permeabilidad, temperatura, movimiento de fluido, etc.), con el objetivo de diseñar la estrategia inicial de desarrollo. Se inicia con la recopilación y selección de datos, se agrupan en capas temáticas (con su respectiva información georeferenciada), para relacionarlas y procesarlas de manera lógica, aplicando modelos simples y de aptitud ponderada por medio de un software SIG (lo que brinda una salida gráfica, que permite una mejor comprensión y análisis de la información), con el fin de seleccionar las áreas aptas para ubicar las plataformas de perforación y zonificar el recurso geotérmico (Fig. 3.15).

Adicionalmente, con el afán de definir las áreas a utilizar para producción, reinyección y amortiguamiento, es necesario disponer de una hipótesis del comportamiento en estado natural del sistema geotérmico, ya que se debe contar con criterios de toma de decisiones que permitan seleccionar los mejores escenarios posibles. Por último, por medio del método volumétrico “USGS Heat in Place”, se estima el potencial de energía que se puede generar; lo que permite calcular la cantidad de pozos necesarios y ubicarlos. Información con la que se plantea la estrategia inicial de desarrollo (Fig. 3.15).

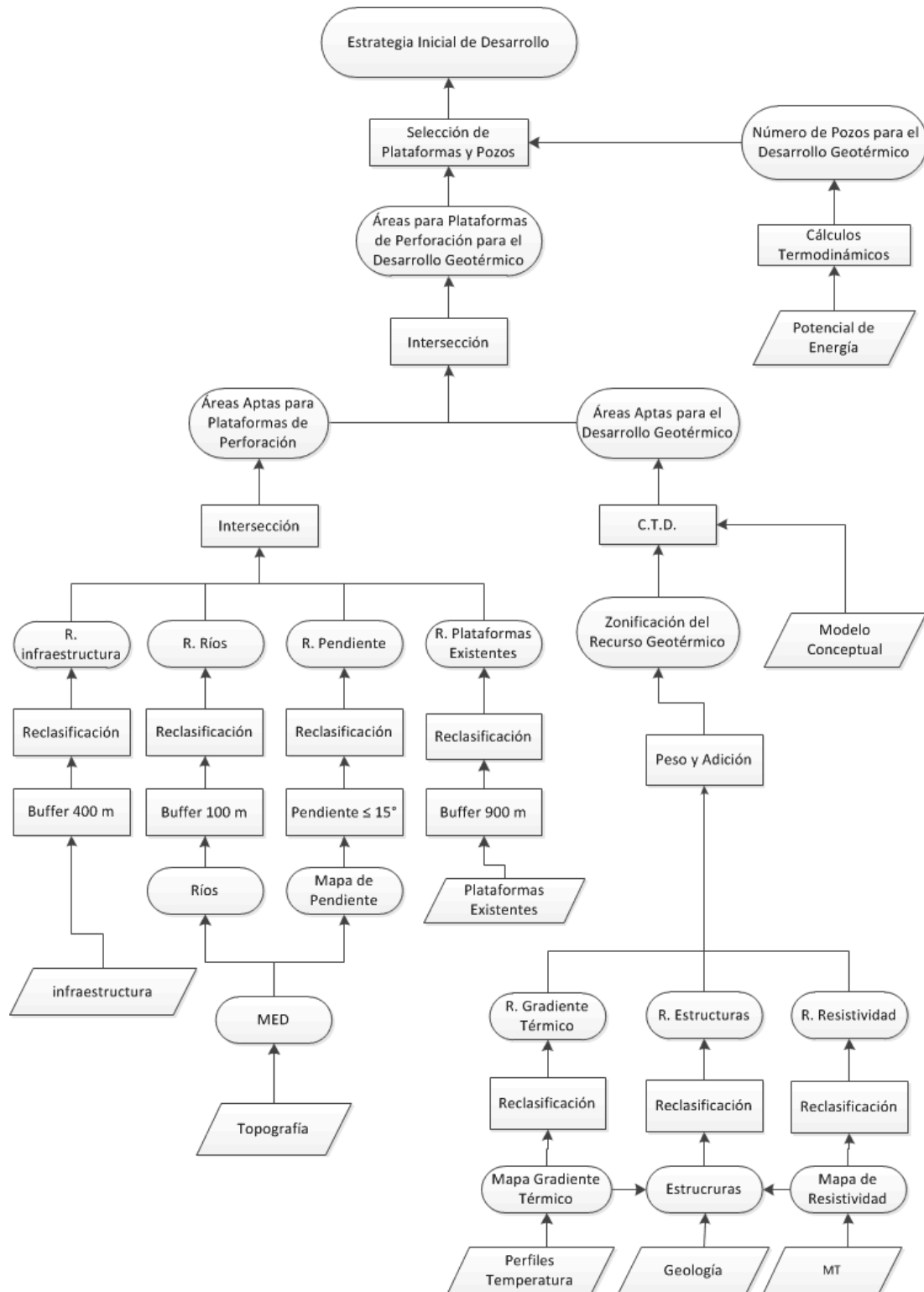


Figura 3.15: Diagrama de flujo de la estrategia inicial de desarrollo planteado para la zona geotérmica Borinquen. CTD Criterio de Toma de Decisiones; MED Modelo de Elevación Digital.

3.3.1 Selección de áreas aptas para ubicar plataformas de perforación

De acuerdo a las máquinas perforadoras utilizadas por el ICE y la experiencia adquirida durante el desarrollo de la segunda etapa del campo geotérmico Las Pailas, se estima que el área adecuada para construir plataformas de perforación con 6 contrapozos es de 25600 m² (160 m * 160 m). Con el fin de seleccionar las áreas que brindan condiciones desde el punto de vista constructivo y funcional para ubicar las plataformas de perforación, se analizan aspectos topográficos, ambientales y logísticos; por medio de un modelo de adecuabilidad binaria. En este caso se utilizan las capas temáticas: “Pendientes”, “Red hídrica” (ambas derivadas del modelo de elevación digital), “Infraestructura existente” y “Plataformas existentes”. Estas capas temáticas se binarizan, e interceptan y el resultado se ha denominado “Áreas aptas para plataformas de perforación” (Fig. 3.15).

3.3.1.1 Pendientes

Al estar ubicado el proyecto en los flancos de un volcán, donde la morfología es irregular, las áreas planas con dimensiones adecuadas para desarrollar plataformas de perforación son reducidas, se decide utilizar terrenos con pendientes iguales o menores a 15° (grados), para evitar excesivos movimientos de tierra, construcción de taludes y obras de contención o refuerzo, de esta forma disminuir la amenaza de inestabilidad de laderas. Por lo tanto, como punto de partida, se utiliza el Modelo de Elevación Digital (DEM) para confeccionar un mapa binario de pendientes y se establece como umbral 15°. Las áreas con pendientes igual o menor al valor mencionado se integra en el estudio, las demás se excluyen (Figs. 3,15 y 3.16a).

3.3.1.2 Red hídrica

Para mitigar la amenaza de contaminación de agua superficial por arrastre de sedimentos o cualquier otra sustancia proveniente del proceso de perforación, de acuerdo a la Ley Forestal de Costa Rica 7575 (1996), se ha definido una distancia buffer de 100 m a ambos márgenes de los cauces de ríos y quebradas, área que es excluida del análisis. De esta forma se garantiza que los sitios seleccionados para ser utilizados como plataformas de perforación, se ubiquen a una distancia mínima de 100 m de los ríos y quebradas (Fig. 3.16b).

3.3.1.3 Infraestructura existente

El turismo es una de las principales actividades que se practica en el área de interés, lo que ha generado la construcción de infraestructura dedicada a este tipo de trabajo. Con el afán de alejar el desarrollo geotérmico de los centros turísticos, se ha creado un área buffer de 400 m alrededor de ellos (Fig. 3.16c).

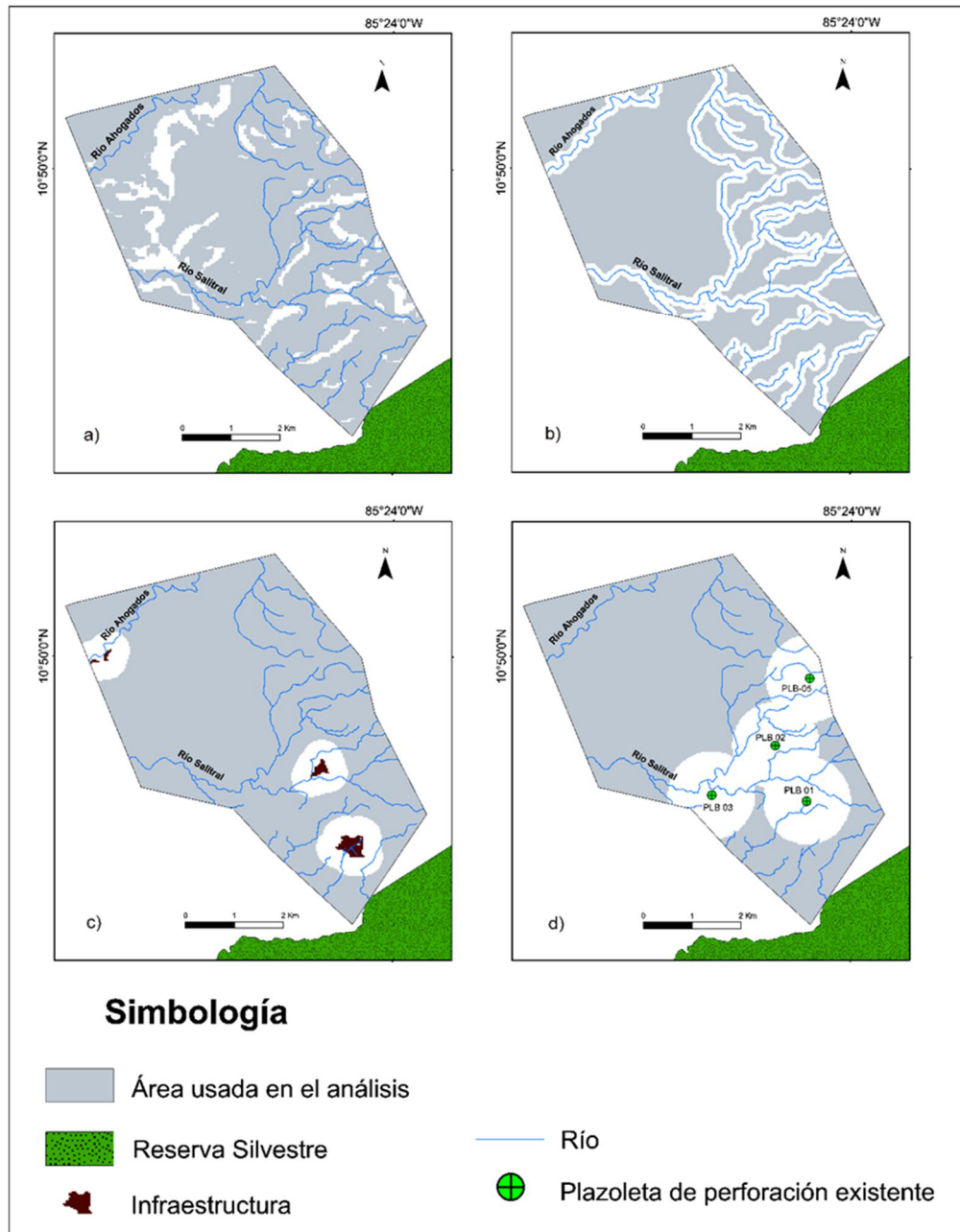


Figura 3.16: Capas temáticas reclasificadas de forma binaria para utilizarlas en la selección de las áreas aptas para ubicar las plataformas de perforación: a) áreas con pendientes menores o igual a 15° . b) área de protección de 100 m alrededor de ambas márgenes de los ríos y quebradas. c) área buffer de 400 m alrededor de la infraestructura existente. d) área buffer de 900 m alrededor de las plataformas de perforación existentes.

3.3.1.4 Plataformas existentes

Actualmente en la zona geotérmica Borinquen, existen cuatro plataformas con un pozo perforado en cada una de ellas; considerando que son plataformas multipozo, se establece una distancia mínima de 200 m para evitar interferencia entre zonas productoras o reinectoras. Para alcanzar los blancos de perforación (planteados de acuerdo a la geología del área y profundidad del reservorio), se varían los factores que constituyen el diseño básico de un pozo

direccional: profundidad de inicio de punto de desvío, rumbo del pozo y/o inclinación del ángulo de perforación. Para obtener la misma distancia de separación entre pozos de diferentes plataformas, se toma en cuenta la capacidad de los equipos de perforación del ICE, que pueden alcanzar un desplazamiento horizontal de 800 m, por lo cual, se ha creado un área buffer de 900 m alrededor de cada plataforma (Fig. 3.16d).

Después de correr el modelo, con los criterios: topográficos, logísticos, ambientales e infraestructura y plataformas existentes, las áreas aptas para construir las nuevas plataformas de perforación se concentran hacia el N y W (3.17). Parte de este resultado, se debe a las condiciones existentes en el S del área de estudio, 3 plataformas de perforación y 2 desarrollos turísticos.

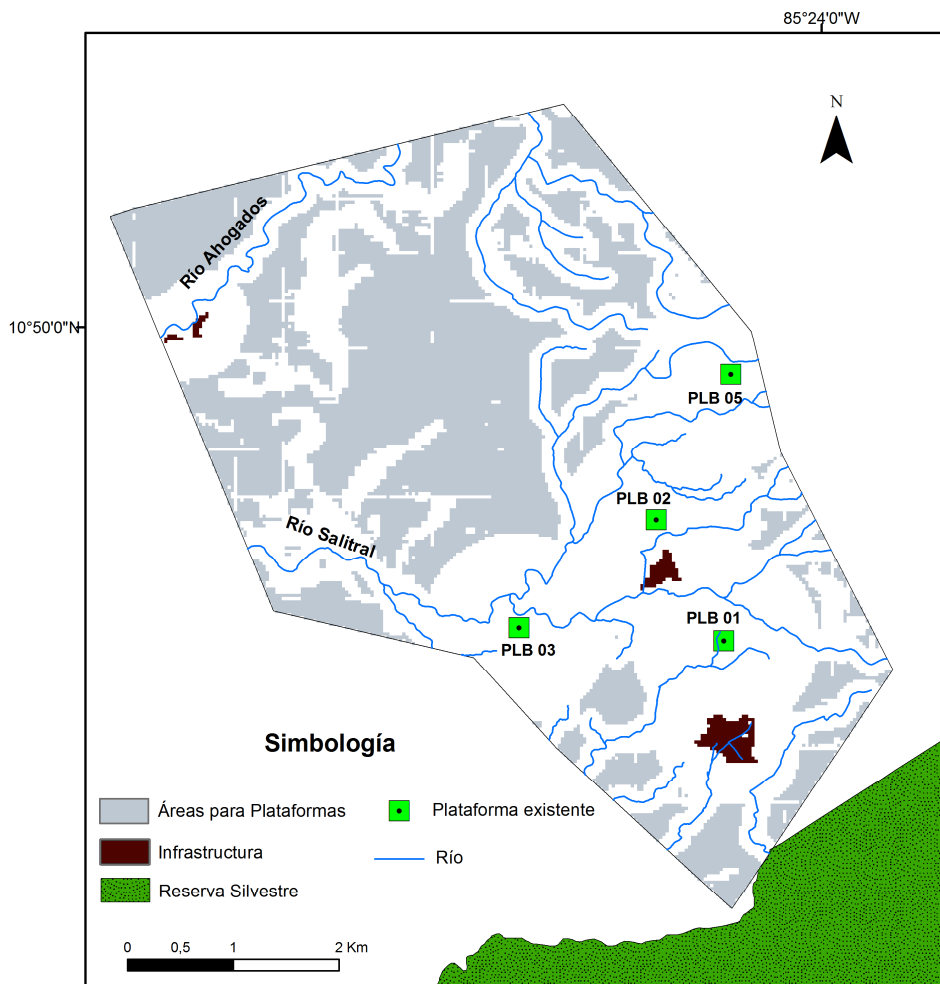


Figura 3.17: Distribución de las áreas aptas para ubicar plataformas de perforación de acuerdo a criterios: topográficos, logísticos y ambientales.

3.3.2 Zonificación del recurso geotérmico de alta entalpía

Para zonificar el recurso geotérmico de alta entalpía, se aplica un modelo de aptitud ponderada, la fortaleza de este método radica en la integración de datos geocientíficos de diverso origen,

lo cual se logra al reclasificar todos los datos usando la misma escala, lo que faculta su relación de manera lógica por medio de un análisis espacial, plasmando los resultados en mapas que delimitan áreas con diferente potencial de recurso geotérmico. Se utiliza la información relacionada directamente con el reservorio geotérmico, en este caso se emplean tres capas temáticas: Resistividad, Gradiente térmico y Estructuras; se reclasifican, se multiplica cada capa por un peso relativo, posteriormente se suman (Fig. 3.15) y los valores más altos son los más aptos. Para asignar los valores de aptitud y peso a las diferentes capas, se estima la incertidumbre del dato, comportamiento de la información analizada en el medio geológico y su nexos con la existencia de recurso geotérmico. Entre más alto el valor de ponderación asignado, mayor importancia tiene la cobertura en el fenómeno analizado. Esta metodología genera diferentes resultados de distribución del recurso geotérmico, al cambiar umbrales y pesos relativos, que facilita valorar y seleccionar diferentes escenarios.

3.3.2.1 Resistividad

Partiendo del hecho que la distribución de la resistividad es un reflejo de la litología, mineralogía de alteración y fluidos presentes en el subsuelo (entre otros factores), para definir la capa temática “Resistividad”, se utilizó el modelo de la estructura geoelectrica definido por Magnetotelúrica (Sección 3.2.3), pues, relaciona la distribución de: resistividad, litología, mineralogía de alteración y temperatura del medio con respecto a la profundidad. En él, la estructura geoelectrica está conformada por una capa de baja resistividad (0 y 10 ohm/m) en las márgenes externas del reservorio, constituida por minerales de alteración hidrotermal dominada por la Zona de Esmectitas, vinculada con temperaturas ≤ 150 °C; que sobreyace un núcleo de mayor resistividad que incrementa hacia la parte interna, atravesando primero la zona de transición conformada por la mezcla de Illite Esmectita, hasta llegar a resistividades que se asocian con la Zona de Illite, relacionada con temperaturas ≥ 220 °C; por lo tanto, condiciones de temperatura comercial de un yacimiento geotérmico de alta entalpía (Tabla 3.3).

Para delimitar el rango de profundidad donde se presenta la capa de baja resistividad, que sobreyace un núcleo con valores que incrementan con la profundidad, se empleó el modelo de inversión de la resistividad en tres dimensiones generado por West JEC (2011). Al examinar la distribución de la resistividad en diferentes plantas, se observa que a 500 m de profundidad, la capa con valores menores a 10 ohm/m se extiende por toda el área de estudio (Fig. 3.18). A 1100 m, esta capa tiende a desaparecer y se desplaza hacia los márgenes, y da lugar a valores de hasta 40 ohm/m, relacionadas con la zona de transición (Fig. 3.18). A 1750 m, la distribución y valores de la resistividad aparente de hasta 100 ohm/m, indican que esta zona presenta mayor probabilidad de estar asociada a un reservorio geotérmico de alta entalpía, por

consiguiente, se selecciona para realizar el análisis geoespacial y se reclasifica con base en los datos de la Tabla 3.7, (Figs. 3.18 y 3.19a).

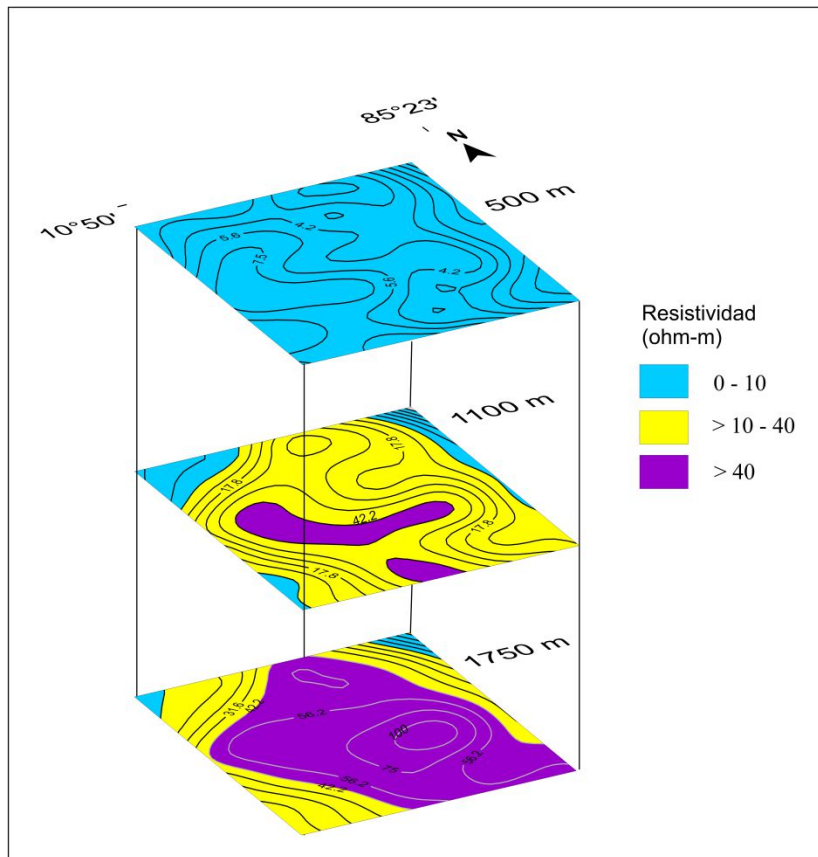


Figura 3.18: Distribución de la resistividad con respecto a la profundidad (modificado de West JEC, 2011): capa a 500 m de profundidad con valores menores a 10 ohm/m, capa a 1100 m de profundidad con valores hasta de 40 ohm/m y capa a 1750 m de profundidad con valores hasta de 100 ohm/m.

3.3.2.2 Gradiente térmico

En un ambiente hidrotermal activo, la energía calórica contenida en la roca es transportada por el fluido geotérmico, que utiliza fracturas y porosidad conectada entre sí para su movilidad. Por ende, la distribución espacial y magnitud de la anomalía térmica está directamente relacionada con la disposición de calor, permeabilidad y fluido en el medio. Lo anterior, torna la identificación y análisis de la distribución de la anomalía térmica en información invaluable, necesaria para localizar sectores con viabilidad de poseer recurso geotérmico. Por consiguiente, se utiliza la distribución del gradiente térmico (Sección 3.2.6) y se define la capa temática “Gradiente térmico”; se integrada en el proceso, se reclasifica con base en los valores de la Tabla 3.7 (Figs. 3.12 y 3.19b). La confiabilidad de los datos, así como su relación con la existencia de recurso geotérmico, justifica la asignación de mayor peso en el análisis geoespacial.

3.3.2.3 Estructuras

En esta cobertura se utilizan las estructuras que de acuerdo a la información existente podrían estar afectando la circulación de los fluidos geotérmicos en profundidad, por lo tanto, se consideran los lineamientos térmicos LT1 y LT3 que afectan la distribución del gradiente térmico; mientras que se descarta el LT2, por ser una barrera hidrogeológica que limita la circulación de los fluidos geotérmicos (Fig. 3.12). Además, se consideran las estructuras geológicas EG1 y EG2 (Fig. 3.7a), que afectan los materiales de la Formación Liberia en profundidad y muestran evidencia de manifestaciones termales en superficie.

En sistemas hidrotermales donde las rocas están calientes, como en el ambiente analizado, se prevé que la densidad de fracturas sea alta y permanezcan abiertas en la cercanía de la traza de la estructura geológica, pero decrezcan en cantidad y tamaño al alejarse, al punto que la permeabilidad remanente estaría relacionada con porosidad primaria conectada y/u otros procesos geológicos. Por lo tanto, se asignan valores de aptitud más altos en las cercanías de la traza y disminuye con la distancia, hasta llegar a un valor de fondo (Tabla 3.7, Fig. 3.19c). Partiendo del hecho que el medio geológico es heterogéneo, el reservorio se encuentra por debajo de 1000 m y la mayor cantidad de información que constituye esta capa temática se ha obtenido de forma indirecta, se asigna el menor peso.

Tabla 3.7: Valores de aptitud y peso asignados a las capas temáticas del escenario de zonificación del recurso geotérmico seleccionado.

Valor Aptitud	Grado de aptitud	Res. aparente (Ω m)	Gradiente. Térmico °C/100 m	Estructural m
1	Bajo			
2		10-30	1 – 10	
3			10 – 15	
4	Medio	30 - 40	15 – 20	>250
5				
6		40 - 50	20 – 25	75 - 250
7	Alto	50 - 60	25 -30	
8		60 - 75	30 -35	25 - 75
9		75 -105	35 – 55	0 - 25
Peso		0,35	0,55	0,1

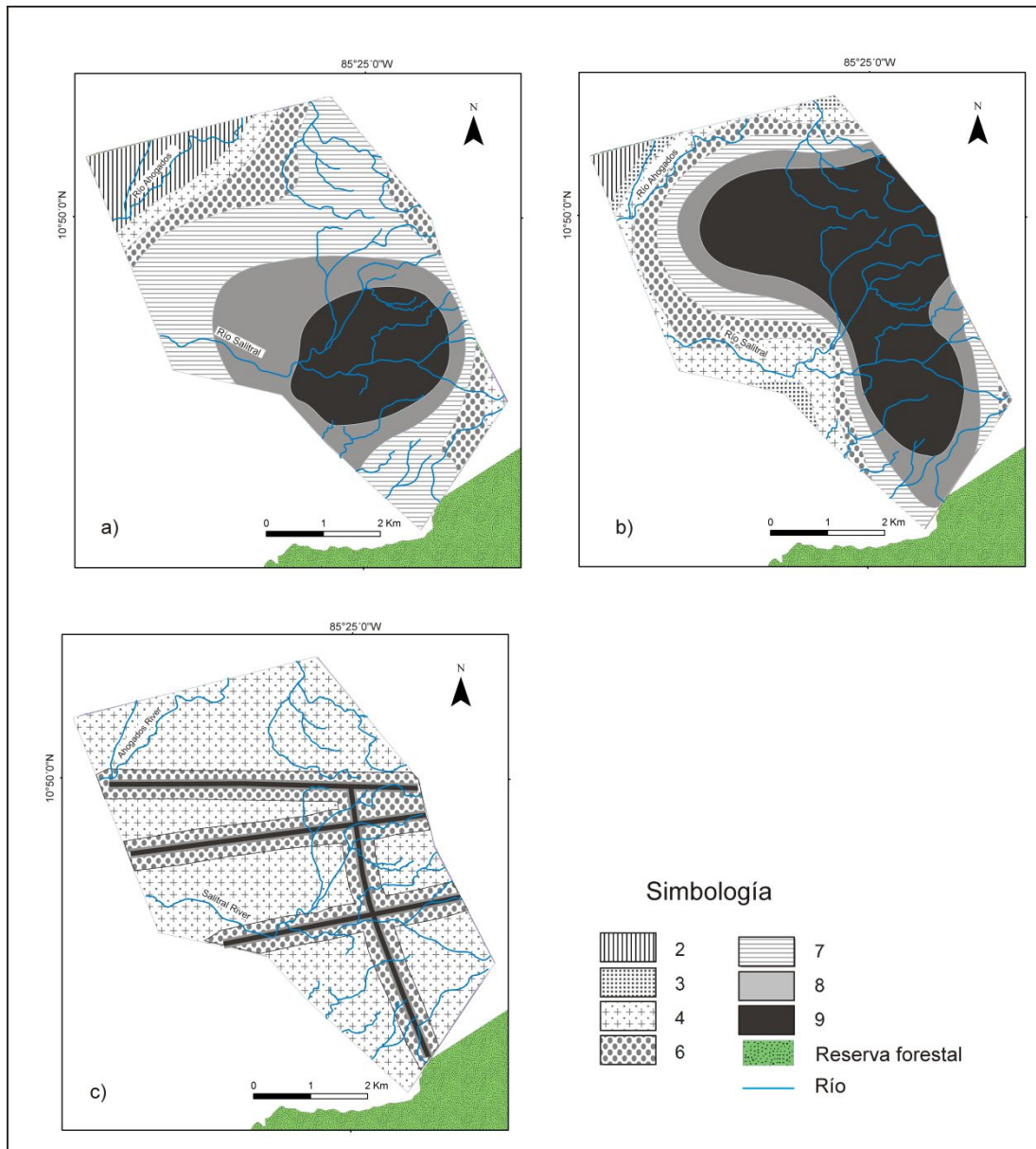


Figura 3.19: Capas temáticas reclasificadas con base en los valores de la tabla 3.7, utilizados en la zonificación del recurso geotérmico: a) resistividad, b) gradiente térmico. c) estructuras.

3.3.2.4 Resultados del modelo de zonificación del recurso geotérmico

Con base en las capas temáticas definidas se utilizó diferentes valores de aptitud y peso para correr el modelo, al examinar los resultados se seleccionó el mostrado la figura (3.20a), para el cual, se utilizó los valores de actitud y ponderación enlistados en la Tabla 3.7. En él, los sectores clasificados como “Potencial de recurso geotérmico muy bueno y bueno” presentan mayor probabilidad de contener recurso geotérmico de alta entalpía; ambos en conjunto abarcan una extensión de 17,6 km², y se constituye en el área máxima con características para desarrollar la zona de producción. No obstante, se plantea un segundo caso, en él se visualiza el área denominada “Potencial de recurso geotérmico muy bueno”, como la mejor opción para

ubicar el polo de producción; pero por su forma y distribución no es la más viable desde el punto de vista conceptual y logístico. Por ende, se modifica y se complementa con parte del área “Potencial de recurso geotérmico bueno” (9,85 km² de extensión), y se define como área más probable (Figs. 3.20a y b). Sin embargo, considerando que en el sector sur, la PLB 01 se encuentra entre 2 desarrollos turísticos, lo cual es un factor que en un futuro puede generar consecuencias negativas para la explotación del recurso geotérmico, se plantea un tercer escenario, en el que se descarta la PLB 01 y alrededores, y se obtiene el área mínima (extensión de 7,31 km²) utilizable como polo de producción (Fig. 3.20b).

Con el fin de extender la vida útil del campo geotérmico, se deben ubicar los pozos de reinyección a una distancia prudente de la zona de producción, por lo que se delimita una distancia de 1 km como zona buffer, que separa las zonas de producción y reinyección. Además, se considera la dirección de descarga natural de los fluidos geotérmicos (E a W) y se selecciona las áreas definidas como “Medio y Bajo potencial de recurso geotérmico”, que presentan gradientes térmicos entre 25 y 35 °C / 100 m para utilizarlas como zona de reinyección. A este producto se le ha denominado “Adecuabilidad del Desarrollo Geotérmico” (Figs. 3.15 y 3.21).

Para definir los sectores viables para ubicar las plataformas de reinyección y producción se intercepta “Adecuabilidad del Desarrollo Geotérmico” con “Áreas aptas para plataformas de perforación”. Es probable que no se necesite ni deban utilizarse todos los sectores delimitados en esta operación, pues, la cantidad y distribución de plataformas y pozos dedicados a la producción y reinyección, así como la capacidad de la planta a instalar, depende del potencial de energía eléctrica que puede generar el yacimiento.

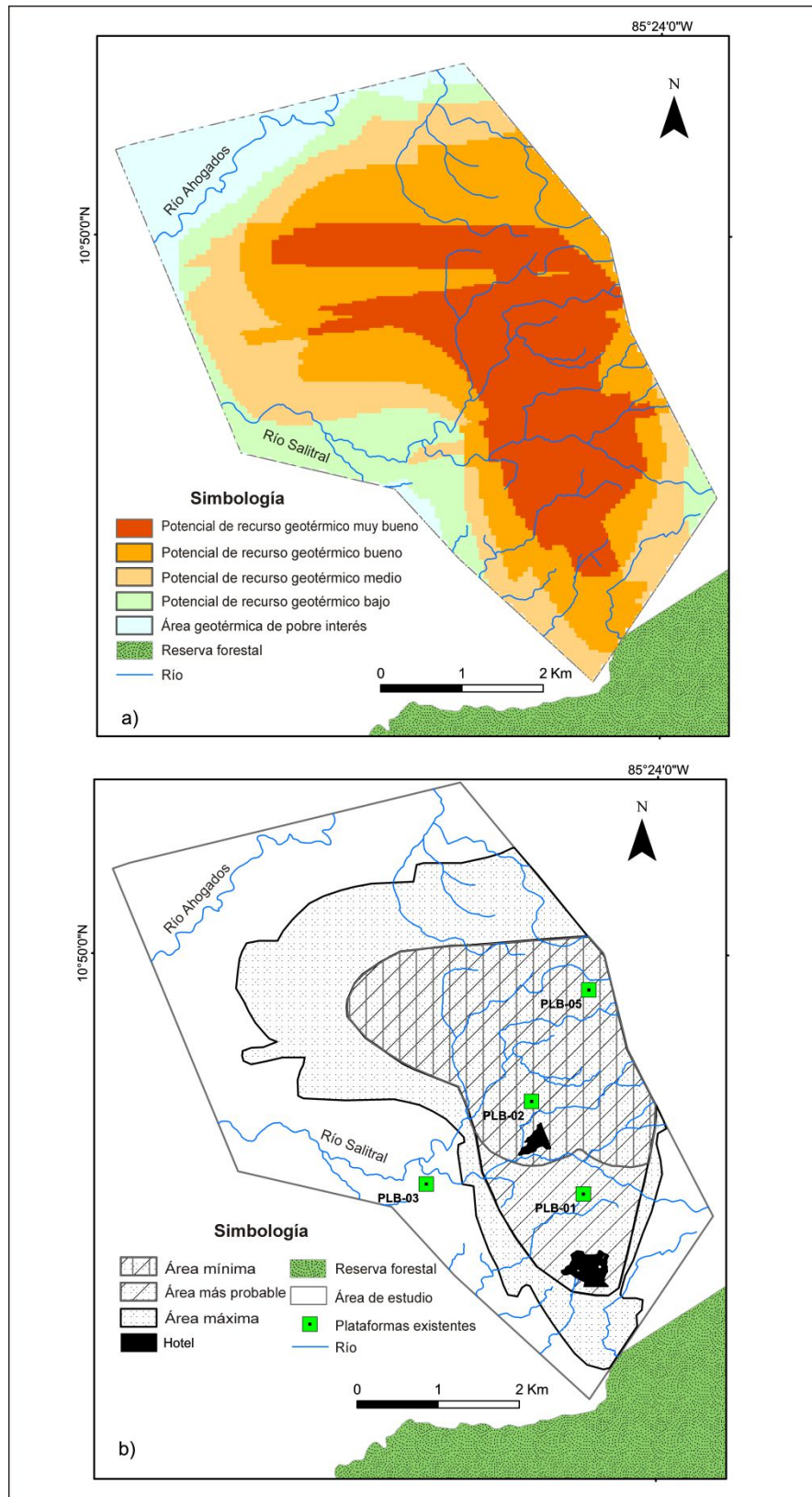


Figura 3.20: Modelo de zonificación del recurso geotérmico de alta entalpía. a) distribución de las áreas de acuerdo al potencial del recurso geotérmico de alta entalpía. b) Delimitación de tres escenarios (máximo, mínimo y más probable) del área que presenta características para desarrollar la zona de producción.

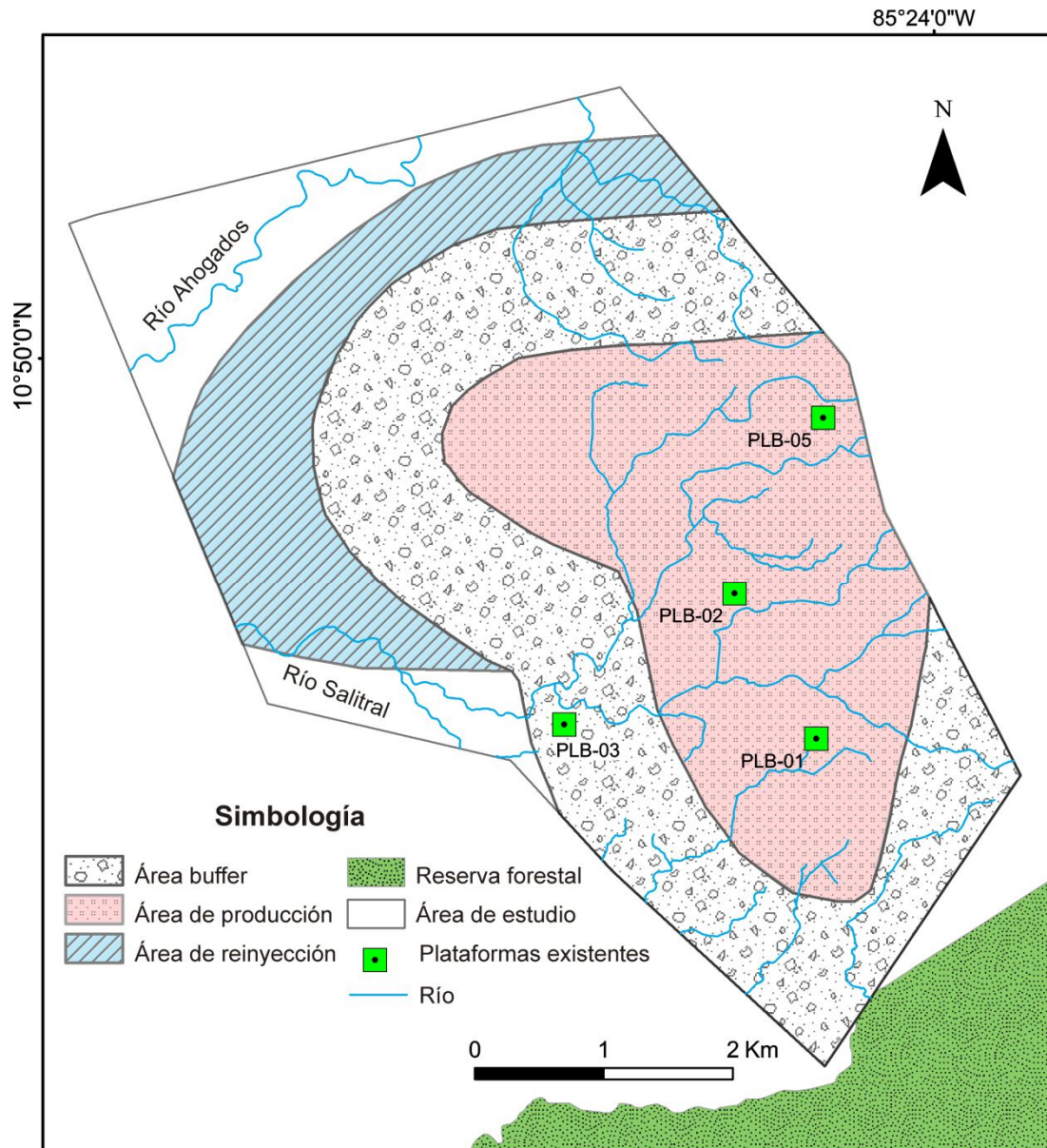


Figura 3.21: Distribución de las principales áreas de acuerdo a su aptitud para el desarrollo del recurso geotérmico de alta entalpia.

3.3.3 Evaluación del potencial energético

Para obtener de forma simple la evaluación del recurso geotérmico y estimar el potencia de energía eléctrica que se podría producir del sistema hidrotermal de la zona geotérmica Borinquen explorado hasta el día de hoy, se utiliza el método volumétrico conocido como “USGS Heat in Palce” o “Stored Heat” (Muffler and Cataldi, 1978; Brook, et al., 1979, Mendrinos et al 2008, Hiriart, 2011), este método proporciona una estimación general del potencial energético más conservador que optimista; lo cual es válido en las etapas tempranas de un proyecto. El método evalúa el recurso geotérmico o cantidad de calor recuperable (RH), al determinar el calor almacenado (SH) en un volumen de roca específico y como técnicamente no se puede extraer todo el calor almacenado en la roca, se multiplica por un

factor de recuperación (RF) que depende de las condiciones geológicas; el fluido producido se enfría de su estado natural a una temperatura base, la cual es la temperatura más baja que permita una viabilidad comercial y técnica de la planta de generación geotermoeléctrica a instalar. La máxima cantidad de energía geotérmica (GE) que puede ser generada del RH depende de la eficiencia en la conversión (CE) de la energía térmica en energía mecánica y para obtener el potencial de energía en MWe (PP), se necesita definir la vida de la planta (PL) y el factor de capacidad de la planta (PCF), o consumo específico. Las ecuaciones utilizadas en el cálculo de potencial energético (Mendrinós et al., 2008; Hiriart, 2011) son:

$$SH = [(1 - \phi) * \rho_r * C_r + \rho_w * C_w] * \mathcal{V} * (T_r - T_f)$$

$$RH = SH * RF$$

$$PP = \frac{RH * CE}{PL * PCF}$$

<i>SH</i>	Calor Almacenado (kJ)
ϕ	Porosidad de la Roca (%)
ρ_r	Densidad de la Roca (kg/m ³)
C_r	Capacidad Calorífica de la Roca (kJ/kg °C)
ρ_w	Densidad del Agua (kg/m ³)
C_w	Capacidad Calorífica del Agua (kJ/kg °C)
\mathcal{V}	Volumen de Roca (m ³)
T_r	Temperatura de Reservorio (°C)
T_f	Temperatura de Reinyección (°C)
<i>RF</i>	Factor de Recuperación
<i>RH</i>	Calor Recuperable (kJ)
<i>CE</i>	Eficiencia de Conversión (%)
<i>PL</i>	Vida de la Planta (años)
<i>PCF</i>	Factor de Capacidad de la Planta (%)
<i>PP</i>	Potencial de energía (MWe)

Con el propósito de compensar la incertidumbre de los parámetros vinculados al reservorio considerados en el cálculo, pues el medio geológico es heterogéneo, es necesario acoplar el método USGS Heat in Place con el simulador Montecarlo (Hiriart, 2011; Garg and Combs,

2010), el cual se aplica para evaluar el potencial de energía eléctrica con un fundamento estadístico y probabilístico, ya que, permite iterar la posible gama de condiciones y obtener una distribución de probabilidad de ocurrencia de almacenamiento de energía y la capacidad eléctrica resultante del potencial reservorio. Con el fin de analizar el efecto de diferentes situaciones de posibles resultados reales, se analiza 3 juegos de datos de las variables más significativas relacionadas con el reservorio geotérmico; denominados: Mínimo (el tamaño más pequeño y la temperatura más baja que el reservorio puede tener, conservador), Máximo (el tamaño más grande y la temperatura más alta que el reservorio puede tener, estimación más liberal) y Óptimo (Tabla 3.8).

Tabla 3.8: Valores utilizados en el cálculo del potencial eléctrico por medio del método USGS Heat in Place y el simulador Monte Carlo.

Propiedades de las rocas	Caso 1 Mínimo	Caso 2 Óptimo	Caso 3 Máximo
Densidad (g/cm ³)	2.40	2.50	2.60
Calor específico (J/g °C)	0,795	0,795	0,795
Porosidad	0,05	0,05	0,1
Propiedades del fluido			
Densidad (g/cm ³)	0,820	0,802	0,781
Calor específico (J/g-°C)	4,186	4,186	4,186
Propiedades del Yacimiento			
Área (Km ²)	7,31	9,85	17,6
Espesor (m)	1000	1200	1500
Temperatura (°C)	240	250	260
Otras Propiedades			
Temperatura de reinyección (°C)	165	165	165
Factor de recuperación	0,10	0,15	0,20
Eficiencia de la conversión	0,45	0,45	0,45
Factor de carga	0,90	0,90	0,90
Energía en la roca (kJ)	9,93758E+14	1,897E+15	4,66563E+15
Energía en el fluido (kJ)	9,4094E+13	1,68648E+14	8,19932E+14
Energía Total	1,08785E+15	2,06565E+15	5,48556E+15
Vida útil de la planta (años)	30	30	30
Capacidad Máxima de la Planta (MWe)	57	164	579

Para asignar los valores de densidad de la roca, se ha hecho uso de núcleos de flujos piroclásticos y lavas, extraídos de profundidades superiores a 1200 m (2.36 - 2.60 g/cm³); la porosidad (permeabilidad) de acuerdo a la literatura, puede alcanzar hasta 10 % (Mendrinós et al 2008) y considerando que el calor específico no varía significativamente, se asume el

mismo valor en los 3 casos. La densidad del fluido se adquirió por medio del análisis de los fluidos geotérmicos obtenidos durante las pruebas de producción de pozos, estimando: profundidad, presión, temperatura y el cloruro de sodio (NaCl) como el componente principal de la salmuera (Robert et al., 1977); el calor específico, al igual que en la roca se asume un mismo valor en todos los casos. El área del yacimiento a explotar se estimó durante la zonificación del recurso geotérmico, el espesor y la temperatura del reservorio se dedujeron al examinar registros termo-hidráulicos (perfiles de temperatura y presión), conjuntamente con las zonas permeables registradas (Fig. 3.22). El factor de recuperación depende de las condiciones geológicas (temperatura de la roca, volumen de fractura, espaciamiento entre fracturas, tasa de circulación de fluido), y después de la estimulación de la permeabilidad puede variar entre un 10 y 50 % (Muffler and Cataldi, 1978; Mit, 2006; Mendrinos et al, 2008). Los demás parámetros: temperatura de reinyección, eficiencia de conversión, factor de carga y vida de la planta, son valores que no varían significativamente de un campo y planta geotermoeléctrica a otro (Tabla 3.8).

Los resultados del potencial geotermoeléctrico obtenidos con el modelo volumétrico-Montecarlo, para los tres casos: mínimo (57 MWe), más probable (164 MWe) y máximo (579 MWe), se estimaron para una capacidad máxima de planta con una vida útil de 30 años, flasheo simple y reinyección a 165 °C. Aunque, en los tres casos se obtuvo valores que superan la capacidad de la planta que se desea instalar (50 MWe), estos resultados deben tomarse como una primera aproximación, pues, en esta etapa factores como área, espesor, permeabilidad y temperatura del reservorio presentan una incertidumbre alta.

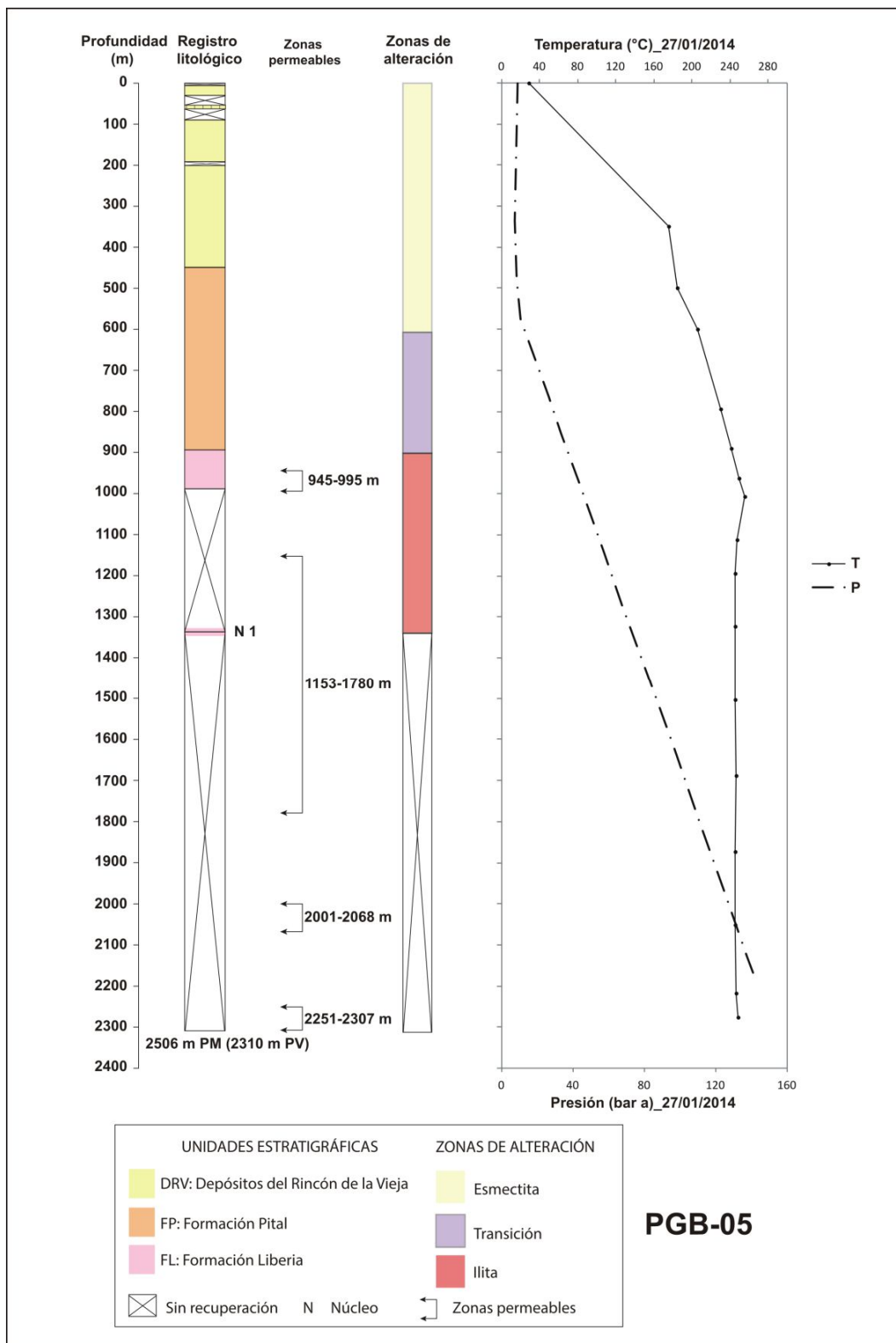


Figura 3.22: Características geológicas y termohidráulicas del Pozo Geotérmico Borinquen 05. Columna litológica, zonas de alteración, zonas de pérdida de circulación del fluido de perforación, perfiles de temperatura estático y presión.

3.3.4 Características de termo-hidráulicas los pozos geotérmicos

Con el fin de complementar la información para plantear la estrategia inicial de desarrollo, entre el 2014 y 2015, se evaluaron los pozos PGB 01, PGB 02 y PGB 05 (Tabla 3.9). De acuerdo a los resultados obtenidos, asumiendo una presión de separación de 6 bares absolutos y una planta de flasheo simple, actualmente se cuenta con un flujo de 58,9 kg/s de vapor y 155,1 kg/s de líquido (Tabla 3.10). Con esta información disponible se presentan 2 escenarios, utilizando los tres pozos productores y descartando el PGB 01, ya que, su ubicación no es estratégica, por encontrarse en medio de 2 áreas turística, estar más alejado de la zona de reinyección y separado del resto del campo por el río Salitral.

Considerando los tres pozos, la entalpía promedio es de 1245 kJ/kg, la potencia disponible al día de hoy es 26,56 MWe, un promedio de 8,85 MWe por pozo. La generación de esta energía produciría 214 kg/s de salmuera, un promedio de 71,3 kg/s por pozo, que debe ser reinyectada. Al descartar el PG 01, la entalpía promedio es mayor 1259 kJ/kg, la potencia disponible al día de hoy disminuiría 21,73 MWe, pero incrementa el promedio por pozo 10,86 MWe. La generación de esta energía produciría 171 kg/s de salmuera, un promedio de 85,5 kg/s por pozo (Tabla 3.9). Esta estimación se basa en los datos preliminares, por lo que el resultado en cada caso debe tomarse como una indicación de la magnitud del probable potencial geotermoeléctrico, pero no como definitivo. Para llegar a un resultado más preciso se deben realizar más perforaciones.

Tabla 3.9: Características termohidráulicas de los pozos de Borinquen (la estimación del flujo de vapor y líquido es calculada con base en 6 bares de presión absoluta). Fecha evaluac. – Fecha de evaluación, Pres. cab. – Presión de cabezal, Entalp. – Entalpía, Ind. Prod. - Índice de producción.

Pozo	Prof. (m)	Fecha evaluac	Pres. cab. bar ab	Flujo Total kg/s	Entalp kJ/kg	Flujo Vapor (kg/s)	Flujo Líquido (kg/s)	Ind. Prod. (kg/s/bar)	Energía vapor (MWe)
PGB 01	2594	10/02/14	9,44	43,0	1190	10,70	32,30		4,83
PGB 02	2107	11/11/15	10,34	114,0	1262	32,30	81,70	5,8	14,57
PGB 05	2310	11/01/15	10,14	57,0	1252	15,90	41,10	2,4	7,16
Total				214,0		58,90	155,10		26,56
Promedio				71,3	1245	19,63	51,70		8,85
Total sin PGB1				171,0		48,2	122,80		21,73
Promedio sin PGB1				85,5	1259	24,1	61,4		10,86

Discusión

Para tener mayor probabilidad de éxito en el desarrollo de un campo geotérmico, se debe entender el contexto geológico que ha dado origen al sistema hidrotermal, pues el hecho de comprender los eventos volcánicos, estructurales e hidrogeológicos que han acaecido y continúan activos en la región es críticamente importante para realizar el modelo conceptual, en el que se sustenta el diseño de la estrategia de desarrollo. Por consiguiente, en este apartado, con base en los resultados de los estudios de exploración realizados en la zona geotérmica Borinquen, se considera la evolución volcano-tectónica del área, se analiza si existen una o más estructuras de calderas de colapso, la presencia de un sistema hidrotermal activo junto con el que se haya desarrollado un reservorio geotérmico de alta entalpía económicamente explotable, y se estima si el potencial energético inherente permite instalar una planta geotermoelectrica de 50 MWe, para lo cual se plantearía una estrategia de desarrollo.

4.1 Evolución volcano-tectónica de la del área de estudio

Con base en características morfológicas del área y la extensa meseta ignimbrítica Santa Rosa, que se extiende en la vertiente Pacífica de los volcanes Rincón de la Vieja – Santa María y Miravalles, previos estudios (Chiesa, 1991; Kempter, 1997; Deering, 2005) han propuesto la existencia de estructuras de colapso caldérico en la vecindad, que explicarían las voluminosas erupciones explosivas; ambiente geológico que favorece la conformación de sistemas hidrotermales con potencial geotérmico, ya que el proceso de formación de calderas volcánicas implica la instauración de grandes volúmenes de magma a profundidad relativamente somera (2 – 5 km). Sin embargo, ninguna de esas investigaciones ha documentado precisamente los límites ni los correspondientes productos eruptivos ligados a esas calderas.

Por lo tanto, a la luz de los datos presentados, se discute si la estratigrafía, estructura, y volcanología del área es compatible con la existencia de una o más estructuras caldéricas, si es así, la discusión se enfoca en identificar los límites estructurales, productos y la edad relacionadas con tales depresiones volcánicas. No obstante, establecer los límites estructurales

de las calderas es generalmente difícil; pues no siempre están bien definidos, de acuerdo a Lipman (1997), son inmediatamente enlargados por deslizamientos ocurridos en las paredes inestables de la caldera recientemente formadas. Adicionalmente, pueden estar afectados por tectonismo, o cubiertos por productos postcaldéricos. Por otra parte, la secuencia de erupción responsables del colapso caldérico no es siempre evidente. Sin embargo, si se desea definir una depresión volcánica como una caldera formada por el colapso del techo de una cámara magmática después de un vaciado masivo durante la erupción volcánica, es esencial definir los límites y/o productos que formaron la caldera.

4.1.1 Estratigrafía

Es evidente en la región, que la Formación Liberia es la principal unidad estratigráfica aflorante, confirmado por la reconstrucción estratigráfica basada en el trabajo de campo, y particularmente en la estratigrafía obtenida de los ripios y núcleos de las perforaciones geotérmicas, que claramente sugieren que la Formación Liberia corresponde a una erupción formadora de una caldera. Hay considerables diferencias en espesores que sobrepasan los 1000 m entre la zona geotérmica Borinquen y las áreas circundantes. Esta unidad formadora de caldera descansa directamente sobre el basamento precaldérico correspondiendo al Grupo Bagaces. Con base en la correlación estratigráfica y el mapeo de campo, se cuantifica un volumen mínimo de $\sim 40 \text{ km}^3$ para la parte extracaldérica de la Formación Liberia, el cual podría ser superior, ya que parte del depósito fue emplazado en el mar y alguna ceniza se perdió en la atmósfera. El espesor promedio intracaldérico de la Formación Liberia, el cual corresponde principalmente a la ignimbrita de Liberia es de 1350 m, determinados en los pozos (Tabla 3.2). No obstante, con el fin de establecer correctamente el volumen intracaldérico de esta unidad, es necesario identificar los bordes estructurales para determinar el tamaño de la caldera.

4.1.2 Límites estructurales de la Caldera

Morfológicamente el límite topográfico de la hipotética caldera, responsable de la erupción de la Formación Liberia se localiza en el sector SW del eje volcánico del Rincón de la Vieja–Santa María. Sus bordes topográficos sur y suroeste están bien delimitados por rocas precaldéricas del Grupo Bagaces, identificado como una banda de forma arqueada extendida desde la estructura F1 al oeste hasta la F7 en el sureste del campo geotérmico Las Pailas (Fig. 4.1), presenta paredes arqueadas y fuertes pendientes que se elevan más de 100 m desde su base, con una altitud máxima de 500 m s.n.m. en el sur y 300 m s.n.m. al suroeste. Mientras que el límite estructural de la caldera corresponde con la lineación de domos dacíticos de la Formación Cañas Dulces, que se encuentra hacia el lado cóncavo del límite morfológico (Fig. 4.1). Considerando las edades y la relación estratigráfica de los domos, apunta que fueron

emplazados inmediatamente después de la formación de la caldera, a través de algún sistema de fallas que controló el colapso caldérico, lo cual de acuerdo a Geyer y Martí (2008), es característico de calderas calco-alcalinas alrededor del mundo.

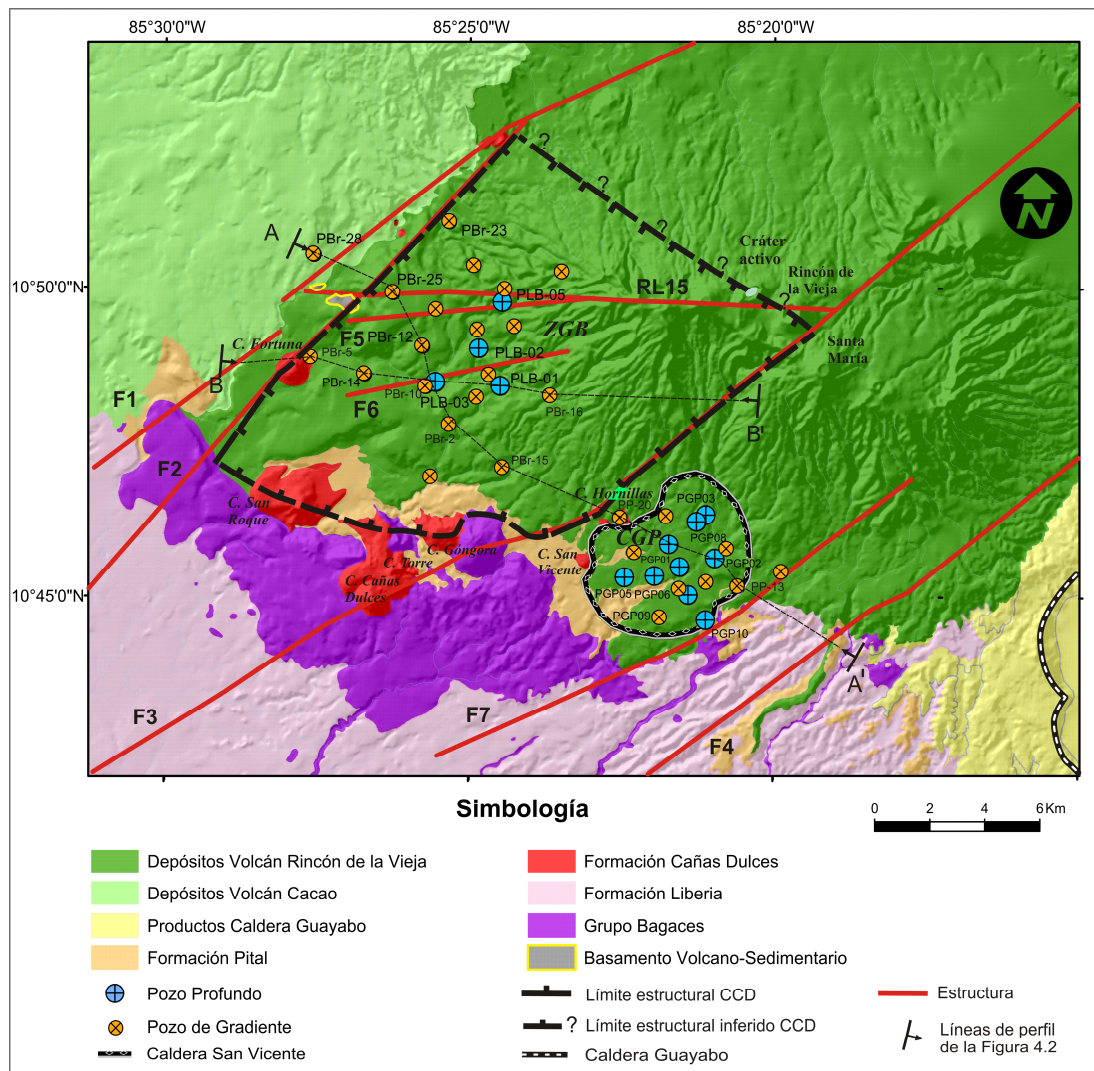


Figura 4.1: Mapa geológico simplificado y límites estructurales inferidos de la caldera Cañas Dulces. CGP – campo geotérmico Las Pailas, ZGB – zona geotérmica Borinquen.

Los demás bordes estructurales son menos evidentes morfológica y estructuralmente. Sin embargo, por los datos recopilados se sugiere que los límites noroeste y sureste son definidos por las estructuras F2 y F3, respectivamente, indicando que la subsidencia de la caldera fue fuertemente controlada por sistemas de fallas preexistentes. Lo cual es confirmado por el hecho que el máximo espesor de la sucesión intracaldérica (Formación Liberia) está delimitado entre estos dos límites. Además, la parte superior de esta sucesión se profundiza hacia las estructuras F2 y F3 (Tabla 3.2, Fig. 4.2), sugiriendo que esos lineamientos actúan como fallas normales que controlaron el colapso caldérico y la subsecuente subsidencia tectónica de la depresión caldérica.

El límite SE de la caldera, está evidenciado por los domos San Vicente y Hornillas, área de debilidad influenciada por la estructura F3, esta falla, además de cortar secuencias precaldéricas, separa los edificios volcánicos Rincón de la Vieja y Santa María. En este sector hay dos mínimos gravimétricos separados por la estructura F3; uno corresponde al borde sureste del principal mínimo gravimétrico, y el otro a la caldera San Vicente (Molina 2000). Esta pequeña caldera se originó durante episodios posteriores que ocurrieron adyacentes a la CCD, indicado por el hecho de que la Formación Liberia alcanzó un espesor máximo de 39 m (pozo PGP 02), similar al medido en los afloramientos en esta área (Fig. 4.2a).

El límite noreste de la CCD está sepultado bajo los depósitos postcaldera, que impiden que el mínimo gravimétrico causado por la baja densidad de la Formación Liberia sea revelado. Sin embargo, es plausible que este límite se podría extender desde el extremo noreste de la estructura F2 cerca del afloramiento de la lava riolítica-dacítica de la Formación Cañas Dulces (Fig. 4.1) hasta el F3, pasando por debajo del centro del volcán Rincón de la Vieja. La traza exacta del límite noreste al día de hoy no puede ser definida, ya que no hay evidencia morfológica o estructural clara en superficie. Únicamente el lineamiento regional RL15 fue identificado en esta área, el cual corre E-W y es definido por el alineamiento de seis cráteres del volcán Rincón de la Vieja y una cicatriz de deslizamiento. Es posible que el sector más hacia el E del lineamiento haya jugado un rol importante como complemento del límite noreste de la caldera; sin embargo, es improbable que el resto del RL15 tuviera injerencia, ya que es incompatible con la presencia de material de la Formación Cañas Dulces al norte de este lineamiento. Por otra parte, la presencia de estos materiales también disuade colocar el límite estructural de la caldera más al norte de su ubicación.

Lo expuesto anteriormente indica que la caldera de Cañas Dulces tuvo un fuerte control estructural, resultando en una forma aproximadamente rectangular de $\sim 12 \times 10$ km, con una superficie mínima de alrededor de 120 km^2 (Fig. 4.1). Por lo tanto, asumiendo un espesor del orden de 1350 m para la parte intracaldera de la Formación Liberia y una diferencia media de altitud de 200 m entre la parte superior de la Formación Liberia y la parte superior de la unidad precaldera que forma el borde estructural de la caldera, se obtiene un colapso vertical mínimo de 1550 m. Esta cifra multiplicada por el área de la caldera da un volumen mínimo de 186 km^3 para la depresión de la caldera. El volumen de la Formación Liberia puede estimarse multiplicando el espesor total de la intracaldera por el área de la caldera estructural, que da 162 km^3 . Al agregar a este valor el volumen de extracaldera (40 km^3), calculado anteriormente, se obtiene un volumen total de 202 km^3 para la Formación Liberia, lo que concuerda bien con el volumen estimado de la depresión de la caldera, considerando que estos valores corresponden al volumen de roca sin su densidad equivalente.

4.1.3 Formación de la caldera Cañas Dulces

La evolución volcano-tectónica del área en la que se desarrolló la caldera Cañas Dulces inició durante el Eoceno-Oligoceno, como resultado de un “estrechamiento” producido por el acercamiento relativo entre las placas Norteamérica y Sudamericana, que generó una deformación interna de la placa Caribe (Gursky, 1988; Astorga et al. 1991), geodinámica responsable de la formación de las principales estructuras regionales F1, F2, F3 y F4, que posteriormente fueron utilizadas para facilitar el ascenso y acumulación de magma a niveles someros en la corteza, dando lugar a la formación durante el Mioceno del arco volcánico interno en esta área.

Las rocas volcánicas más antiguas en el área de estudio son predominantemente secuencias de espesos flujos de lavas andesíticas pertenecientes al grupo Aguacate, descritas en la base de las perforaciones del CGP. No obstante, hace $8,75 \pm 0,86$ Ma, dio inicio los primeros episodios de vulcanismo explosivo y formó secuencias de ignimbritas andesíticas (Unidad Curubande), que afloran en el borde de la caldera Cañas Dulces. Subsecuentemente, la corteza oceánica inicia su transformación en corteza continental, dando lugar a un intenso episodio de vulcanismo silicio explosivo responsable de la formación de la meseta Ignimbrítica de Santa Rosa (Grupo Bagaces) durante el Mioceno-Cuaternario, los cuales podrían ser relacionados con centros de emisión pre-caldera Cañas Dulces, que hoy día no muestran expresiones morfológicas ni estructurales claras de su existencia. Sin embargo, el domo dacítico Góngora Viejo, datado en $7,96 \pm 0,53$ Ma., localizado en el límite volcánico-tectónico correspondiente a la estructura F3, en el límite sur de la CCD (sin ser relacionado con ella), es posible evidencia de calderas pre-Cañas Dulces; pues su edad sugiere que puede ser contemporáneo con uno de los depósitos más antiguos de la Meseta Ignimbrítica de Santa Rosa (depósito del flujo piroclástico Carbonal, fuera del área de estudio) datado en $7,8 \pm 0,16$ Ma. (Guillot et al., 1994). El estrato volcán Alcántaro, correspondiente a la parte superior del Grupo Bagaces, estuvo establecido en un área ahora ocupada por las calderas Cañas Dulces y San Vicente. Ese complejo volcánico desde sus inicios fue controlado por el sistema de fallas F1 en el oeste y F3 en el centro (Fig. 4.3a)

Posteriormente, hace 1,43 Ma., se produjo el episodio de colapso de la caldera que destruyó la mayor parte del volcán Alcántaro. Esto generó la erupción de grandes volúmenes de magmas riolítico dacíticos y el vaciado masivo de la cámara magmática asociada, principalmente a través de fallas preexistentes (F2 en el noroeste y F3 en el sureste), seguido por el colapso de su techo, que de acuerdo a la distribución de los productos de la Formación Liberia, se asume un mecanismo de colapso tipo pistón, formando la caldera Cañas Dulces (Fig. 4.3b). La erupción que forma la caldera inició con una fase Pliniana corta que generó delgados depósitos

finos de caída y varias oleadas piroclásticas intra-Plinianas, que rápidamente se desarrolló en proporciones masivas, emplazando diferentes unidades de flujo que formaron la ignimbrita de Liberia. Este episodio de colapso de caldera fue seguido tiempo después por la extrusión del magma restante en forma de una serie de domos de composición dacítica (1,41 Ma., Formación Cañas Dulces) a lo largo de las fallas que controlaron el colapso de la caldera (Fig. 4.3c). La actividad poscaldera fue seguida por la deposición de una sucesión formada por depósitos de piroclásticos y epiclásticos (Formación Pital), que inician el relleno de la caldera, durante la cual se originó la caldera San Vicente, adyacente a la caldera Cañas Dulces.

Como ha ocurrido en muchas otras calderas silíceas (Geyer y Martí, 2008), la formación de la caldera de Cañas Dulces y posteriormente la caldera de San Vicente, afectó en gran medida la instauración de un nuevo sistema magmático poco profundo, que culminó en la construcción del estratovolcán Rincón de la Vieja-Santa María (Fig. 4.3d).

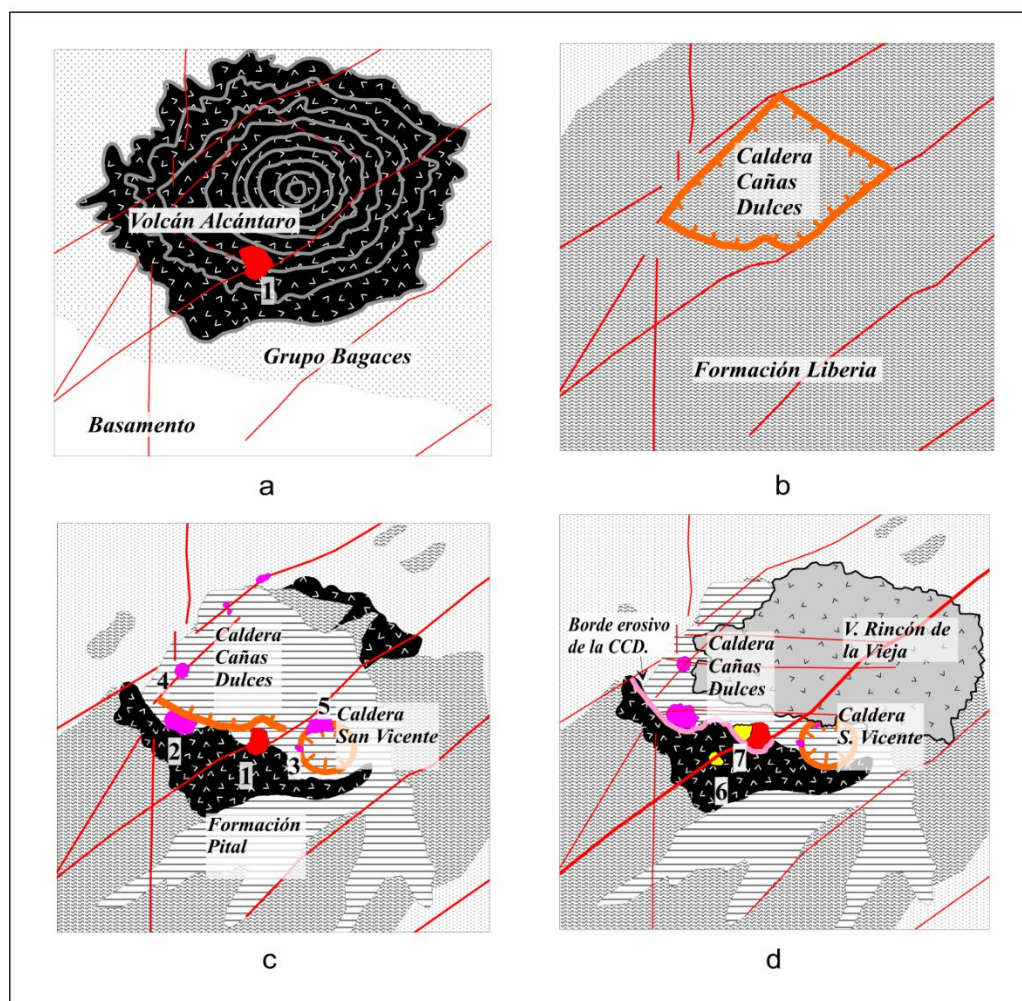


Figura 4.3: Esquema de la evolución volcano-tectónica del área de estudio y formación de la caldera de Cañas Dulces. 1- domo Góngora Viejo, 2- domo San Roque, 3- domo San Vicente, 4- domo Fortuna, 5- domo Hornillas, 6- domo Cañas Dulces, 7- domo Góngora Joven.

4.2 Sistema hidrotermal zona geotérmica Borinquen

En Borinquen se ha seleccionado y explorado un área de 31 km²; con el afán de corroborar si durante la evolución geológica, por su génesis, se ha desarrollado un sistema hidrotermal conjuntamente con un yacimiento geotérmico de alta entalpía, comercialmente explotable; con el fin de plantear el modelo conceptual del sistema geotérmico Borinquen. Para lo cual, es necesario determinar la existencia de: una fuente de calor y un reservorio geotérmico con su respectiva capa sello, que contenga fluido con temperatura mayor o igual a 220 °C, a una profundidad menor a 3 km. Lo cual, se busca dilucidar con la información disponible que se comenta a continuación.

Durante la construcción de 4 pozos profundos se determinó que el orden de aparición de las zonas de alteración presenta un patrón normal de incremento de la temperatura con la profundidad. Donde los minerales de alteración dentro de la anomalía de calor marcan condiciones de temperatura de un reservorio de alta entalpía a partir de una elevación que oscila entre -60 y -165 m s.n.m., definido por el inicio de la Zona de Illita. Lo antes expuesto se refleja en la estructura geoelectrica, que permite inferir el piso de la capa sello a una altura de -100 m s.n.m. Este espesor de la capa sello está constituido por un volumen de roca que incluye la Unidad de Depósitos del Rincón de la Vieja, la Formación Pital y parte de la Formación Liberia. Además, por debajo de la capa sello, incrementa la abundancia de los minerales de mayor temperatura. No obstante, hacia el SW (PGB 03) está ausente la zona de Illita y la anomalía térmica se profundiza sugiriendo que no hay un reservorio geotérmico a la profundidad explorada en este sector.

En el resto del área estudiada, la mineralogía de alteración y distribución del gradiente térmico revelan la presencia de una fuente de calor activa en las cercanías, que da origen a dos sectores separados con mayor flujo de calor. En los alrededores del PBr-7, la anomalía térmica parece estar relacionada con una pluma de calor ascendente, evidenciada en superficie por diversas manifestaciones termales que alcanzan el punto de ebullición y acusan la existencia de un flujo ascendente (Fig. 3.12). No obstante, hacia el W, el gradiente decrece rápidamente, indicando la existencia de una barrera hidrogeológica que impide el paso de los fluidos calientes hacia el sector del PGB 03. Por otra parte, hacia el N, la anomalía térmica se extiende en dirección E-W, la separación de las curvas de isogrado en esta área indican una buena transferencia de calor, probablemente relacionadas con permeabilidad que permite el paso de los fluidos.

Sin embargo, la magnitud de un sistema geotérmico accesible depende enteramente de la extensión de las zonas permeables, y consecuentemente, una de las mayores limitaciones en profundidad lo representa la ignimbrita riolítica-dacítica masiva con permeabilidad primaria reducida y un espesor superior a 1000 m, que limita la circulación de los fluidos a través de

las estructuras que cortan estos productos. Por ende, la permeabilidad del sistema está asociada principalmente a estructuras geológicas y en menor proporción contactos entre litologías y espesores de material permeable, principalmente en la unidad Bagaces (pre-existentes al colapso). Por lo que se torna trascendental para desarrollar el recurso geotérmico de alta entalpía, identificar las fallas geológicas que cortan los productos sincaldéricos y precaldéricos, pues constituyen los pasos preferenciales por donde circulan los fluidos geotérmicos. Lo que implica profundizar los pozos hasta alcanzar los sectores donde estas estructuras influyen en la permeabilidad del medio.

En términos generales, el sistema hidrotermal evidenciado en superficie por la presencia de manifestaciones térmicas, está limitado por las fallas maestras responsables del colapso caldérico F2 y F3 y la estructura regional F1 (Fig. 4.4a). No obstante, en el área explorada (zona geotérmica Borinquen) es difícil identificar fallas geológicas que afecten la circulación de los fluidos en profundidad; a pesar de evidencia de discontinuidades estructurales (estructuras geológicas y resistivas) que no necesariamente afectan el sistema geotérmico en profundidad. Sin embargo, al unir esa información con el análisis de la distribución del gradiente térmico, se obtiene una mejor interpretación, por ejemplo, en el N y NW del área estudiada, el gradiente térmico decrece paulatinamente, manifestando comunicación hidráulica, es probable que el sistema estructural F1 y F2 haya incrementado la permeabilidad en esta zona. Igual comportamiento ocurre hacia el sur, posiblemente la falla F3 y el TL1 favorecen la permeabilidad. Por otra parte, el lineamiento térmico TL3 con rumbo E-W, que se alinea con los cráteres del volcán Rincón y ubicado cerca de la estructura F4 (EG1 y LL6), juega un rol importante en el sistema hidrotermal, ya que, distribuye el flujo de calor desde la cercanía de la fuente de calor, que por su ubicación y edad se relaciona con el actual volcán Rincón de la Vieja, más que con magma residual de la cámara magmática de la caldera Cañas Dulces. Además, los lineamientos térmicos TL1 y TL2 con dirección N-S tienen influencia en el control de la circulación de los fluidos hidrotermales (Fig. 4.4a), mientras que el TL1 distribuye el flujo de calor en dirección N-S, el TL2 funciona como una barrera hidrogeológica que impide el movimiento de los fluidos calientes y por lo tanto responsable de reducción del reservorio geotérmico hacia el SW. Por último, la estructura F5 (EG2) combinada con TL1, podría causar la permeabilidad suficiente para generar el ascenso de la pluma de calor en el sector sur del área explorada.

Por otra parte, para determinar el origen del fluido del sistema geotérmico, es crucial precisar la procedencia del agua de recarga. Las características geográficas de Costa Rica y del área de estudio en el NW del país, causan que el volcán Rincón de la Vieja sea afectado por lluvias provenientes de ambas vertientes, siendo el clima de la vertiente Caribe más lluvioso y turbulento, mientras que, el lado pacífico considerablemente más seco. Lo expuesto explica la

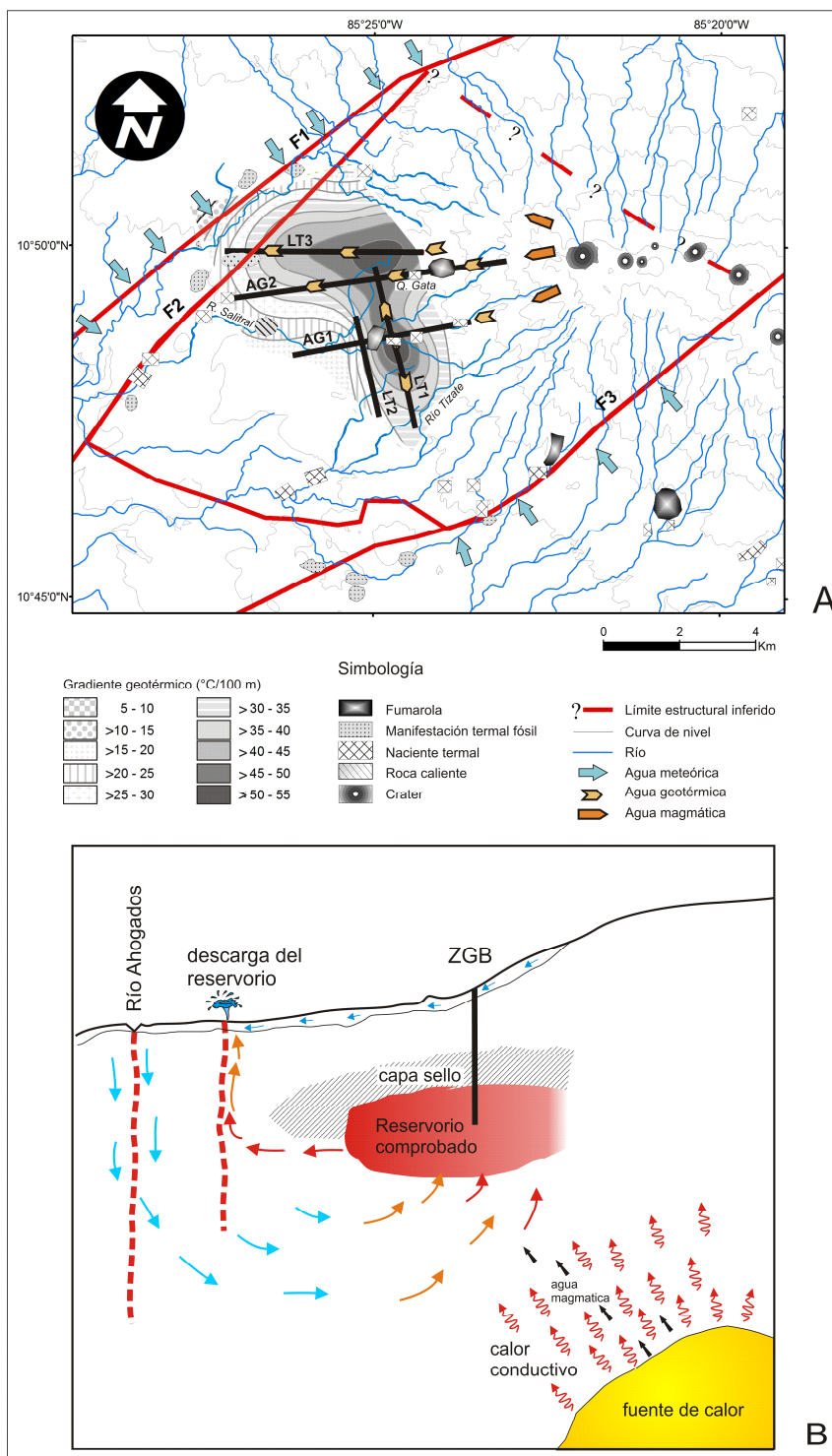
distribución del D con respecto a la altura en la vertiente Pacífica del área de investigación (Fig. 3.13): el agua meteórica entre 55 y 235 m s.n.m es producto de precipitaciones provocadas por la humedad proveniente del pacífico, mientras que entre los 715 y 1790 m s.n.m. es causa de las precipitaciones que proceden de la vertiente del Caribe. Así mismo, entre 235 y 715 m s.n.m, las concentraciones de D podrían ser el resultado de mezcla de agua procedente de ambas vertientes. Sin embargo, el intervalo de elevación mencionado puede disminuir, pues no se cuenta con análisis de agua meteórica entre 235 y 715 m s.n.m.

Por medio de las concentraciones de los aniones SO_4 , Cl y HCO_3 se identificó tres tipos de aguas. No obstante, únicamente el agua proveniente de las nacientes Salitral Norte (SN1 y SN2) resultó agua madura, que ha alcanzado un equilibrio con la roca a una temperatura cercana a los 235 °C, datos que sugieren su relación con un reservorio de alta entalpía. Mientras que las muestras provenientes de los pozos geotérmicos PGB 01, PGB 02 y PGB 05 indican temperaturas del orden de 280 °C; la menor temperatura de las nacientes SN obtenida por medio del geotermómetro Na-K-Mg, se puede deber a reacciones de reequilibrio en su proceso de ascenso. Por otra parte, la relación Cl/B, sugiere que las aguas provenientes de las nacientes SN y las de los pozos PGB 01, PGB 02 y PGB 05, pueden tener un vínculo genético, el cual es confirmado por la concentración de los isótopos $\delta^{18}\text{O}$ y δD de las muestras de SN y los pozos del PGB 01 y PGB 02, pues se asocian por medio de una línea de dilución. Esto también confirma que, estas manifestaciones que afloran sobre la traza de la F2 son una descarga del reservorio geotérmico de alta entalpía ubicado en la zona de Borinquen, constituido por 16,4 % de agua magmática proveniente del volcán Rincón de la Vieja y 83,6 % de agua meteórica, con una composición isotópica $\delta^{18}\text{O} = -6,75$ y $\delta \text{D} = -43,4$, correspondiente a una altura cercana a 950 m s.n.m. (Figs. 3.13a y 3.14), por lo tanto, procedente de lluvias de la vertiente Caribe.

4.2.1 Modelo conceptual

Con base en la información anterior se diseña el modelo conceptual del sistema hidrotermal con recurso geotérmico de alta entalpía comercialmente explotable, ubicado en el flanco oeste del volcán Rincón de la Vieja, que será utilizado como guía para el futuro desarrollo y explotación del campo geotérmico Borinquen. La fuente de calor se ubica hacia el E, relacionada con el volcán Rincón de la Vieja, la cual irradia calor y fluidos magmáticos. El agua meteórica proveniente principalmente de la vertiente Caribe, escurre de las faldas NW y W del Rincón de la Vieja y del SE del volcán Cacao, drenadas por la cuenca del río Ahogados, representa la principal fuente de recarga al aprovechar la permeabilidad generada por el sistema de estructuras F1 y F2; en este sector el agua se infiltra y se desplaza hacia el E (Fig. 4.4a y b). De forma similar se hipotiza que sucede en la falda sur del Rincón de la Vieja,

donde el agua meteórica aprovecha la estructura F3 para infiltrarse y desplazarse hacia el NW. En ambos casos hasta alcanzar profundidades donde entra en contacto con roca caliente y se mezcla con fluidos magmáticos. Posteriormente ascienden y se almacena en las rocas de las formaciones Bagaces y Liberia, hasta chocar con la base de la capa sello (-100 m s.n.m.), lo que impide que migren hasta la superficie, formando un reservorio sodio clorurado (~ 6000 ppm), pH neutro, con una temperatura cercana a los 235 °C, pudiendo llegar a 280 °C, compuesto por 83.6 % de agua meteórica y 16.4 % de agua andesítica, que se desplaza de forma natural hacia el W, tal y como lo revela los pozos geotérmicos y la descarga del reservorio (SN) y posiblemente también drene de forma natural hacia el sur; aunque en este sector no se ha detectado ninguna descarga del reservorio.



4.3 Estrategia inicial de desarrollo

Durante el desarrollo de un proyecto geotérmico se estima que las etapas iniciales (exploración y desarrollo) son las de mayor riesgo, pues, al final de estas fases se ha hecho la inversión de construcción del proyecto, con incertidumbre de la existencia del recurso geotérmico en la proporción necesaria para el funcionamiento adecuado de la central eléctrica. No obstante, aun teniendo éxito en estas etapas, el riesgo no acaba allí, pues se debe garantizar el recurso geotérmico para la adecuada operación de la planta por un período mínimo de 30 años. Por ende, el desarrollo de un campo geotérmico se debe realizar mediante una estrategia que, además plantee las bases para asegurar una idónea explotación del yacimiento.

Partiendo del hecho que la energía geotérmica es renovable, pero el recurso geotérmico es sostenible; la estrategia de desarrollo debe estar enfocada en alcanzar un equilibrio que permita la sostenibilidad del recurso, para minimizar el riesgo de caída de presión, temperatura, o agotamiento del yacimiento, lo cual es la clave para extender la vida útil y lograr que el proyecto sea económicamente rentable. Por lo tanto, es de suma importancia tener conocimiento de la distribución de los elementos que constituyen el sistema hidrotermal (modelo conceptual) y de la zonificación del recurso geotérmico, con el fin de seleccionar y delimitar las áreas a utilizar para: producción, buffer y reinyección de los fluidos geotérmicos. Además, contar con la estimación del potencial para establecer el tamaño de la planta a instalar y de acuerdo a ella, la cantidad de pozos de producción y reinyección, de forma que no se exceda la capacidad productiva del campo, pues resultaría en la pérdida parcial de la inversión.

El modelo conceptual planteado para la zona geotérmica de Borinquen, ubica la fuente de calor al E (Fig. 4.4); considerando que, la explotación del recurso geotérmico se basa en extraer el fluido presente dentro de la roca caliente a través de pozos de producción (Mendrinós et al., 2008); estos se ubican en las áreas con mayor potencial, por lo general, más cerca de la fuente de calor. En este caso en particular, se delimitó una superficie de 9,85 km², apta para ubicar el polo de extracción y considerando las condiciones logísticas y ambientales, así como la extensión horizontal máxima y separación entre pozos, se ha identificado 4 sectores viables dentro de esta área para ubicar plataformas de producción (Fig. 4.5).

En la otra mano, para lograr la sostenibilidad del recurso, se busca alterar lo menos posible el flujo natural de los fluidos y mantener la presión de soporte del yacimiento, para lo cual, se utiliza la reinyección; sin embargo, los sistemas geotérmicos son susceptibles a los cambios de su estado natural, por consiguiente, en este proceso se debe evitar descomprimir y/o enfriar el reservorio. Lo que implica un buen conocimiento de la hidrogeología de la región, que permita ubicar los pozos de reinyección estratégicamente, siguiendo el flujo natural de los fluidos, en áreas de menor temperatura, pero conectados con el reservorio, de tal forma

que, la diferencia de presión y temperatura de los fluidos reinyectados en primer instancia obstruyan el paso natural de los fluidos geotérmicos a una distancia prudente de la zona de extracción, al punto que, cuando los pozos de producción inicien la extracción y causen una presión negativa producto del abatimiento, los fluidos reinyectados migren hacia la zona de explotación, con un periodo de residencia que permita recuperar la temperatura necesaria para evitar el enfriamiento del yacimiento. De esta forma, el reservorio es remplazado por la reinyección del fluido utilizado y la energía geotérmica es extraída (solamente el calor), sin que el reservorio pierda la totalidad de la masa empleada, pues, por las experiencias vividas en los campos geotérmicos Miravalles y Las Pailas, se estima que en el proceso se pierde alrededor de un 15 % de la masa extraída.

En Borinquen para seleccionar la zona de reinyección se consideró el área de recarga principal del agua meteórica y la dirección de descarga de los fluidos geotérmico del sistema hidrotermal en su estado natural (sin ser perturbados), con base en esta información se ubicó la zona de reinyección al N y W, se creó un área buffer con una distancia mínima de 1 km entre el límite externo de la zona de producción y el interno de la zona de reinyección. Considerando que este sector presenta un gradiente térmico superior a 35 °C/100 m, se estima que, en el medio hay suficiente energía calórica para que la salmuera reinyectada en su viaje recobre la temperatura necesaria antes de retornar al proceso industrial. No obstante, se recomienda analizar el diseño de la estrategia a través de una simulación de yacimiento, cuando exista un mínimo de 5 pozos entre productores y reinyectores, con una distribución espacial adecuada, para obtener información más realista, y valorar la conveniencia de realizar cambios. Pues, en un área relativamente pequeña como Borinquen, es indispensable estar preparado para realizar ajustes durante la etapa de desarrollo y parte de esa flexibilidad se obtiene al utilizar perforación direccional, que permite desde una misma plataforma realizar diferentes perforaciones; así como, modificar el diseño del pozo (profundidad de inicio del punto de desvío, ángulo de perforación y/o dirección del pozo), para variar la distancia entre zonas de producción y/o reinyección, así como la separación mínima estimada entre pozos (200 m), si fuese necesario.

Al evaluar el potencial energético del reservorio, estimando una vida útil de la planta de 30 años, en los 3 casos analizados, el campo tiene energía suficiente para instalar una unidad con capacidad de 50 MWe. Valor con que se continúa conceptualizando la estrategia de desarrollo, y se calcula el número de pozos que se requieren para extraer y reintegrar la salmuera al reservorio. No obstante, con el fin de garantizar una producción geotermoeléctrica estable las 24 horas del día, los 365 días del año, es necesario disponer de 30 % de energía de respaldo como mínimo. Por lo tanto, la cantidad de pozos de producción necesarios para generar 50 MWe, se calcula con base en 65 MWe; mientras que el número de pozos de reinyección, se

estima con base en 50 MWe. Además, se considera la tasa de éxito en el proceso de perforación de pozos geotérmicos que tiene el ICE (85 %). Por consiguiente, haciendo uso de la información obtenida de las pruebas de producción de las perforaciones existentes (Tabla 4.1), se plantean 2 escenarios: utilizando los 3 pozos productores y descartando el PGB 01.

4.3.1 Escenario 1: utilizando los pozos PGB 01, PGB 02 y PGB 05

Desde el punto de vista de producción, con base en las condiciones termodinámicas de los 3 pozos existentes, el promedio de energía por pozo perforado es de 8,85 MWe. Por lo tanto, para disponer de 65 MWe, se necesitan 7,3 pozos, al considerar la tasa de éxito se requieren $8,44 \approx 9$ pozos de producción, como ya existen 3, se debe perforar 6 nuevos pozos. En lo que respecta al proceso de reinyección, y partiendo del supuesto de que cada pozo que se va a perforar acepta 70 l/s (sujeto a comprobación), siendo conservador, pues corresponde a un índice de inyectabilidad bajo 2 l/s*bar. Considerando la producción de energía promedio por pozo de 8,85 MWe, se extraerá una masa de total de 71,33 kg/s; para producir 50 MWe se obtendría 403 kg/s, que deben ser reinyectados. En consecuencia, es necesario perforar $6,5 \approx 7$ pozos reinyectores incluido el factor de éxito.

4.3.2 Escenario 2: utilizando los pozos PGB 02 y PGB 05

Si se descarta el pozo PGB 01, el promedio de energía por pozo perforado es de 10,86 MWe. Por lo tanto, para disponer 65 MWe se necesitan 6 pozos, al considerar la tasa de éxito, se requieren $6,68 \approx 7$ pozos de producción, como ya existen 2, se deben perforar 5 nuevos pozos. En lo que respecta al proceso de reinyección, y partiendo del supuesto de que cada pozo que se perfora aceptará 70 l/s; considerando la producción promedio de energía por pozo de 10,86 MWe, se extraerá una masa de 85,50 kg/s; para producir 50 MWe se obtendrían 394 kg/s, que deben ser reinyectados. Por lo tanto, es necesario perforar $6,47 \approx 7$ pozos reinyectores incluido el factor de éxito.

4.3.3 Selección de plazoletas y pozos

De acuerdo al método volumétrico USGS Heat in Place, en conjunto con el simulador Monte Carlo y los parámetros establecidos, los tres casos evaluados brindan un panorama positivo. En ellos, la zona geotérmica Borinquen tiene un potencial energético extraíble suficiente para instalar una unidad geotermoeléctrica con capacidad de 50 MWe, por un periodo de vida útil de 30 años (Tabla 3.8). Sin embargo, el Caso 1 es el más conservador y viable desde el punto de vista de estrategia de desarrollo, en él se destina un volumen de $7,31 \text{ km}^3$ de yacimiento geotérmico como zona de producción. Para desarrollar este sector se utiliza el escenario 2, se aprovechan los pozos PGB 02 y PGB 05, por lo que se presupuesta 5 nuevos pozos de producción y 7 de reinyección. Aunque las perforaciones de producción se pueden realizar

desde las plataformas existentes, se recomienda construir 2 plazoletas más PLB 06 y PLB 09 (Fig. 4.5). De esta forma, considerando la disposición de 4 plazoletas y únicamente 2 pozos perforados, teóricamente se dispone de 22 opciones para ubicar los siguientes 5, lo que genera una amplia gama de escenarios. Por lo tanto, se propone realizar una perforación desde la PLB 09 con rumbo E y otra en la PLB 06 con rumbo NE, con el fin de conocer más el campo (Fig. 4.5). En lo que respecta al proceso de reinyección, es probable que el objetivo se logre con menos pozos, pero esto dependerá de los resultados de las primeras perforaciones. Siguiendo el mismo análisis, se debe construir 3 plataformas de reinyección (PLB 07, PLB 08 y PLB 10) y perforar un pozo en cada una de ellas, dirigidos hacia la zona de reinyección (PLB 08 al NNW, PLB 07 al NW y PLB 10 al W). De acuerdo a los resultados de las perforaciones y las simulaciones numéricas, se afinan los cálculos, se ajusta la estrategia de desarrollo, y se seleccionan los pozos restantes.

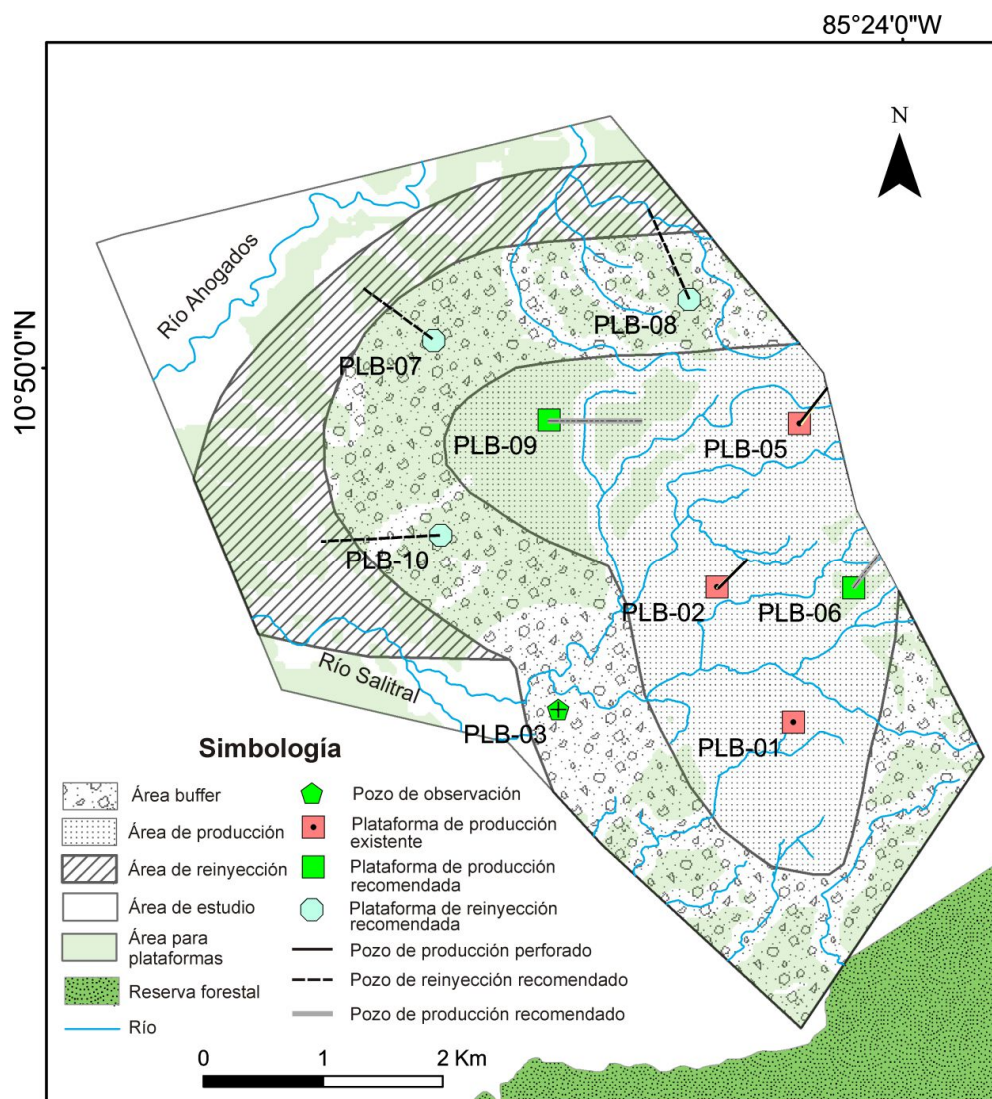


Figura 4.5: Estrategia inicial de desarrollo para la zona geotérmica de Borinquen. .

Conclusiones

Con el fin de mejorar la comprensión del sistema hidrotermal relacionado con la zona geotérmica de Borinquen, se ejecutó los estudios geocientíficos desde la etapa de prospección hasta el inicio del desarrollo. Considerando que se debe conocer la geología de la región para entender la geotermia, los trabajos iniciales de exploración se orientaron a dilucidar la evolución volcano-estructural del lugar. Seguidamente, los estudios se enfocan en comprobar la existencia de un sistema hidrotermal con potencial geotérmico económicamente explotable. Por último, la información se sintetizó y vinculó metódicamente, para plantear una estrategia inicial de desarrollo, que permita ubicar los blancos de perforación en busca de incrementar la probabilidad de éxito y disminuir el costo del desarrollo del futuro campo geotérmico Borinquen.

5.1 Conclusiones

Por medio de geología de campo, sensores remotos, estratigrafía de pozos geotérmicos de exploración, dataciones radiométricas, geología estructural y geofísica, se identificó y construyó un modelo comprensivo de la evolución volcano-tectónica, en la que se vislumbran dos eventos que marca el potencial geotérmico de alta entalpía del área estudio, el origen y evolución de la caldera Cañas Dulces y la instauración de los actuales estratovolcanes Rincón de la Vieja – Santa María.

El colapso caldérico sucedió hace 1,43 Ma., en el sector noroeste del arco magmático interno de Costa Rica, como resultado de una erupción masiva de magma dacítico – riolítico, que dio origen a la formación de la ignimbrita de Liberia y depósitos asociados. El colapso caldérico fue principalmente controlado por fallas preexistentes y generó una depresión de 186 km³ en volumen, que fue llenado principalmente con productos sincaldéricos. La formación de la caldera causó la destrucción del sistema magmático superficial y permitió la intrusión de magmas más profundos, que progresivamente formaron un sistema magmático más superficial dentro de los límites de la caldera. Este nuevo sistema fue el responsable de la construcción

de los estratovolcanes Rincón de la Vieja – Santa María, cubriendo la mayor parte de la estructura caldérica.

La formación de la caldera y la instalación de un nuevo sistema magmático poco profundo han creado condiciones adecuadas para el desarrollo de un sistema hidrotermal en el flanco oeste del volcán Rincón de la Vieja, sector central W de la caldera Cañas Dulces, que por medio de los estudios de mineralogía de alteración, magnetotelúrica, hidrogeoquímica, gradiente térmico e isótopos estables; se determinó los elementos que prueban la existencia de un reservorio geotérmico de alta entalpía comercialmente explotable. Aunque en un inicio se vislumbró que la fuente de calor pudo estar asociada al sistema magmático que causó el colapso caldérico; tal y como lo comenta Gottsmann and Martí (2008), las calderas volcánicas son sitios ideales para el desarrollo de sistemas geotérmicos de gran magnitud debido a los volúmenes de magma que se acumulan en el subsuelo a poca profundidad; la evidencia muestra que debido a la edad de la ignimbrita de Liberia, con el paso del tiempo perdió el potencial geotérmico; pero intrusiones magmáticas relacionada con el volcán Rincón de la Vieja originaron una nueva fuente calor. Aun así, la extensión y dinámica del sistema hidrotermal continúa controlada por los límites estructurales de la caldera y el sistema de fallas regionales que favorecieron el colapso. El agua meteórica proveniente en su mayoría de la vertiente Caribe, principal fuente de recarga, aprovecha la permeabilidad generada por sistemas de estructuras para infiltrarse, hasta alcanzar profundidades donde entra en contacto con roca caliente y se mezcla con fluidos magmáticos. Posteriormente asciende y se almacena en las rocas del Grupo Bagaces (materiales precaldéricos) y la Formación Liberia (materiales sincaldéricos), hasta chocar con la base de la capa sello, formando un reservorio sodio clorurado, de pH neutro, con una temperatura igual o superior a 235 °C, que fluye de forma natural hacia el W.

Este ambiente geológico motivó el diseño de una estrategia inicial de desarrollo, en la que se establecen las áreas idóneas para ubicar: las plataformas de perforación, zonas de producción y reinyección. Al analizar por medio del método volumétrico USGS Heat in Place y el simulador Monte Carlo, utilizando 3 juegos de datos para definir el área que será dedicada como zona de producción, se concluye que, aun el escenario más conservador (7.31 km³ de yacimiento geotérmico), la zona geotérmica de Borinquen tiene potencial energético extraíble para instalar una unidad geotermoeléctrica con capacidad de 50 MWe, por un periodo de vida útil de 30 años. Para desarrollar este escenario se debe perforar 5 pozos de producción, por lo que se recomienda construir las plazoletas PLB 06 y PLB 09. De esta forma se dispone de una amplia gama de opciones para ubicar los siguientes 5 pozos. Sin embargo, en esta etapa, aun con gran disposición de alternativas, no es oportuno acelerar el proceso de perforación realizando más de un pozo a la vez, pues se debe esperar los resultados del pozo perforado,

para utilizarlos en la selección y ubicación del siguiente. Por lo tanto, para conocer más el reservorio bajo el área designada para producción se propone, realizar una perforación desde la PLB 09 con rumbo E y otra en la PLB 06 con rumbo NE (Fig. 4.5). Por otra parte, se debe perforar 7 pozos de reinyección, lo cual amerita construir las plataformas PLB 07, PLB 08 y PLB 10, y perforar un pozo en cada una de ellas, dirigidos hacia la zona de reinyección (PLB 08 al NNW, PLB 07 al NW y PLB 10 al W). Bajo estas condiciones, considerando instalar una planta geotermoeléctrica de 50 MWe, para desarrollar el campo geotérmico Borinquen, hace falta realizar 12 pozos geotérmicos, con un costo promedio estimado de 4 millones de dólares USA (para el ICE), la inversión necesaria únicamente en el proceso de perforación ronda los \$ 48 millones de dólares USA.

Durante el desarrollo de esta tesis doctoral, uno de los objetivos planteados fue, realizar un análisis comparativo de la estructura interna y comportamiento hidrotermal entre la zona geotérmica Borinquen y el campo geotérmico Las Pailas. A la luz de los resultados se puede concluir que, el colapso de la estructura caldérica San Vicente se genera posterior a la caldera Cañas Dulces, lo cual es evidenciado por la ubicación estratigráfica y los espesores de la Formación Liberia en el interior de ambas depresiones caldéricas. Es probable que el cambio de esfuerzos en el área provocado por la formación de la caldera Cañas Dulces favoreciera el emplazamiento de magma residual a menor profundidad, y debilitara el flanco sureste del volcán Alcántaro, controlado por las estructuras F3 y F7 (Fig. 4.1), culminando con el colapso que generó la caldérica San Vicente (depresión semicircular, con un diámetro promedio de 4,5 km). Su basamento constituido por rocas del terciario de los Grupos Bagaces y Aguacate, se localiza a una elevación de 200 m s.n.m. De acuerdo a Molina (2009), con base en 11 pozos de gradiente, el sector con mayor energía calórica se ubica al norte y norte – noreste, evidenciado en superficie por las manifestaciones termales de Las Pailas (Fig. 3.10). Por otra parte, al analizar la composición de isotopos estables $\delta^{18}\text{O}$ y δD provenientes del yacimiento del campo geotérmico Las Pailas, se vislumbra que son más pesados que los del sistema hidrotermal de la zona geotérmica Borinquen, indicando que aun estando en las faldas del mismo macizo volcánico, separados por una distancia de 8,5 km, los yacimientos geotérmicos de Las Pailas y Borinquen son dos sistemas independientes.

En términos generales, la caldera San Vicente por ser un evento superficial, de poca magnitud, no tiene ninguna injerencia con el sistema hidrotermal que alimenta el campo geotérmico Las Pailas. Aunque el colapso caldérico estuvo controlado por las estructuras F3 y F7, la distribución de las manifestaciones termales y gradiente térmico, sugieren que el sistema hidrotermal se extiende fuera de esta área y probablemente su límite E está controlado por la estructura regional F4 (Figs. 4.1 y 4.2a); además, su fuente de calor parece estar relacionada con el volcán Santa María y la circulación de los fluidos está controlada por la permeabilidad

de las rocas precaldéricas (grupos Aguacate y Bagaces). La composición isotópica del agua meteórica de recarga de este sistema es $-5,4$ ^{18}O y $-32,5$ D, corresponde con una altura cercana a los 1300 m, por lo tanto, generada por lluvias provenientes de la vertiente Caribe (Fig. 3.14), su infiltración se da fuera de la Caldera San Vicente.

Por lo tanto, para realizar un análisis exhaustivo entre los sistemas hidrotermales de la zona geotérmica Borinquen y el campo geotérmico Las Pailas, aún hay mucho que investigar y debido al exceso de información ya obtenida con los tres objetivos desarrollados en esta tesis doctoral, este tema se ha dejado para un estudio de Post doctorado.

Referencias

- Arnason, K., Karlsdottir, R., Eysteinnsson, H., Flovenz, O. y Gudlaugsson, S. (2000). *The resistivity structure of high-temperature geothermal systems in Iceland*. Kyushu, Japan: Proceedings WGC.
- Arnórsson, S. (2000). *Isotopic and chemical techniques in geothermal exploration, development and use*. Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency.
- Astorga, A., Fernández, J. A., Barboza, G., Campos, L., Obando, J., Aguilar, A. y Obando, L. G. (1991). Cuencas sedimentarias de Costa Rica: evolución geodinámica y potencial de hidrocarburos. *Revista Geológica de América Central*, (13), pp. 25-59.
- Axelsson, G. y Gunnlaugsson, E. (2000). *Background: Geothermal utilization, management and monitoring* (pp. 3-10). En: G. Axelsson y E. Gunnlaugsson (Eds). Long-term monitoring of high- and low enthalpy fields under exploitation: WGC2000 Short Courses, Kokonoe, Kyushu District, Japan, 28-30 May 2000. Lennershofstr, Alemania: International Geothermal Association.
- Bellon, H. y Tournon, J. (1978). Contributions de la géochronologie K/Ar á l'étude du magmatisme de Costa Rica. *Amerique Centrale: Bulletin de la Société Géologique de France*, 6, pp. 955-959.
- Benderitter, Y. y Cormy, G. (1990). *Possible approach to geothermal research and relative costs* (pp. 59-69). En: M.H. Dickson and M. Fanelli. (Eds.). Small geothermal resources: A guide to development and utilization. New York, EEUU: UNITAR.
- Bodvarson, G. (1964). *Physical characteristics of natural heat sources in Iceland*. Ponencia presentada en UN Conference on New Sources of Energy, 2. New York, EEUU: United Nations.
- Bodvarson, G. y Bailey, D. (1963). *Report of a mission to investigate Geothermal Prospect in Costa Rica*. San José, C.R.: Instituto Costarricense de Electricidad.
- Brook, C., Mariner, R., Mabey, D., Swanson, J., Guffanti, M. y Muffler, L. (1979). *Hydrothermal Convection Systems with Reservoir Temperatures > 90°C* (pp.18-85). En: Assessment of Geothermal Resources of the United States 1978. Washington D.C., EE.UU.: U.S. Geological Survey.
- Browne, P. (1978). Hydrothermal alteration in active geothermal systems. *Annual Rev. Earth Planet. Sci.*, (6), pp. 229-250.

- Bundschuh, J. y Chandrasekharam, D. (2002). *The geothermal potential of the developing world* (pp. 53-61). En: Geothermal Energy Resources for Developing Countries. Netherlands: Balkema Publishers.
- Carr, M., Saginor, I., Alvarado, G., Bolge, L., Lindsay, F., Milidahis, K., Turrin, B., Feigenson, M. y Swisher, C. (2007). Element fluxes from the volcanic front of Nicaragua and Costa Rica. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 8, pp. 1-22. doi:10.1029/2006GC001396.
- Chiesa, S. (1991). El flujo de pómez biotítica del Río Liberia, Guanacaste, Costa Rica: *Revista Geológica de América Central*, (13), pp. 73-84.
- Costa Rica. Leyes y Decretos. (1996). *Ley Forestal 7575*. San José, C. R.: La Gaceta 72.
- Curewitz, D. y Karson, J. (1997). Structural settings of hydrothermal outflow: Fracture permeability maintained by fault propagation and interaction. *Journal of Volcanol. Geotherm. Res.*, 79(3-4), pp. 149-168. doi:10.1016/S0377-0273(97)00027-9
- Deering, C. (2005). *Petrogenesis of distinct silicic magma types from the low Pleistocene Guachipelin caldera; NW Costa Rica: extensive magma mixing and protracted subvolcanic residence*. (Tesis de Maestría inédita). Michigan State University.
- Deering, C., Vogel, T. A., Patiño, L. C., y Alvarado G. E. (2007). Origin of distinct silicic magma types from the Guachipelín Caldera, NW Costa Rica: evidence for magma mixing and protracted subvolcanic residence. *Journal of Volcanol. Geotherm. Res.*, 165(3-4), pp. 103-126. doi:10.1016/j.jvolgeores.2007.05.004.
- Denyer, P. y Alvarado, G. (2007). *Mapa Geológico de Costa Rica: escala 1:400 000*. San José, C.R.: Librería Francesa.
- Denyer, P., Montero, W., y Alvarado, G. (2003). *Atlas tectónico de Costa Rica*. San José, C.R.: EUCR.
- Fridleifsson, I. (2001). Geothermal energy for the benefit of the people. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 5(3), pp. 299-312.
- Garg, S. y Combs, J. (2010). *Appropriate use of USGS volumetric "heat in place" method and Monte Carlo calculations*. En: Proceedings, Thirty-Fourth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. California, EE.UU. : Stanford University.
- Gehring, M y Loksha V. (2012). *Manual de geotermia: cómo planificar la generación de electricidad*. Washington D.C., EE.UU.: Banco Internacional para la Reconstrucción y el Desarrollo.
- GeothermEx. (2005). *Proyecto geotérmico Las Pailas, informe de factibilidad. vol. I estudio del recurso geotérmico para el Instituto Costarricense de Electricidad*. California, EE.UU. : GeothermEx.
- Geyer, A. y Marti, J. (2008). The new worldwide collapse caldera database (CCDB): a tool for studying and understanding caldera processes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 175, pp. 334-354.
- Giggenbach, W. (1988). Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Ca-Mg geoindicators. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 52(12), pp. 2749-2765.

- Giggenbach, W. (1992). Isotopic shifts in waters from geothermal and volcanic systems along convergent plate boundaries and their origin. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 113(4), pp. 495-510.
- Gillot, P., Chiesa, S. y Alvarado, G.E. (1994). Chronostratigraphy of upper Miocene-Quaternary volcanism in northern Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, (17), pp. 45- 53.
- Goldstein, N. (1988). Subregional and detailed exploration for geothermal-hydrothermal resources. *Geotherm. Sci. Technol*, 1, pp. 303-431. EE.UU: Elsevier.
- Gottsmann, J.H. y Martí, J. (Eds). (2008). *Caldera volcanism: analysis, modelling and response, developments in volcanology* (vol. 10). Amsterdam: Elsevier.
- Gudmundsson, A. (2011). *Rock fracturing in geological processes*. Cambridge, Reino Unido: Cambridge University Press.
- Gursky, M. (1998). Análisis tectónico de la Península de Nicoya (Costa Rica) y su significado para el desarrollo estructural-geodinámico de América Central Meridional. *Revista Geológica de América Central*, (8), pp. 19-75.
- Hiriart, G. (2011). *Evaluación de la Energía Geotérmica en México: informe para el Banco Interamericano de Desarrollo y la Comisión Reguladora de Energía*. México, DF. : Grupo Enal.
- Hochstein, M. (1990). Classification and assessment of geothermal resources. En: Dickson, M.H. and Fanelli, M. (Eds.), *Small geothermal resources: a guide to development and utilization* (pp. 31-57). New York, EE.UU. : UNITAR,.
- Idaho National Laboratory. (2006). The Future of geothermal energy: impact of enhanced geothermal systems (EGS) on the United States in the 21st. EE.UU.:Massachusetts Institute of Technology. Disponible en: <https://energy.mit.edu/wp-content/uploads/2006/11/MITEI-The-Future-of-Geothermal-Energy.pdf>
- Instituto Costarricense de Electricidad. Departamento de Recursos Geotérmicos (1991). *Evaluación del potencial geotérmico de Costa Rica*. San José, C. R.: ICE.
- Instituto Costarricense de Electricidad. Proyecto Geotérmico de Guanacaste. (1976). *Informe de prefactibilidad técnica: geología*. San José, C. R.: ICE.
- Instituto Costarricense de Electricidad. Proyecto Geotérmico Miravalles (1986). *Informe geológico final*. Milano, Italia: ICE.
- Kempton, K.A. (1997). *Geologic evolution of the Rincón de la Vieja volcano complex, northwestern Costa Rica*. (Tesis de Doctorado inédita). University of Texas.
- Kjaran, S. y Eliasson, J. (1983). *Geothermal reservoir engineering lecture notes*. Iceland: UNU.
- Kusmaul, S. (2000). *Estratigrafía de las rocas ígneas en geología de Costa Rica*. Cartago, C.R.: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Lachniet, M. y Patterson, W. (2002). Stable isotopes values of Costa Rican surface water. *Journal of Hydrology*, 260, pp. 135-150.

- Laguna, J. (1984). Efectos de alteración hidrotermal y meteorización en vulcanitas del Grupo Aguacate, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, (1), pp.1-17.
- Lipman, P. (1997). Subsidence of ash-flow calderas: relation to caldera size and magma-chamber geometry. *Bulletin of Volcanology*, 59, pp. 198-218.
- Mainieri, A. (2005). *Costa Rica update report*. Trabajo presentado en Proceedings World Geothermal Congress, Turquía.
- Mechede, M. y Frisch, W. (1998). A plate-tectonic model for the mesozoic and early cenozoic history of the Caribbean plate. *Tectonophysics*, 296 (3-4), pp. 269-291.
- Melson, W. (1988). *Major explosive eruption of Costa Rican volcanoes: update for Costa Rican Volcanism Workshop*. Trabajo presentado en Costa Rican Volcanism Workshop, Skyland, Shenandoah National Park.
- Mendrinós, D., Karytsas, C. y Georgilakis, P. (2008). Assessment of geothermal resources for power generation. *Journal of Optoelectrics and Advanced Materials*, 10, pp. 1262-1267.
- Molina, F. (2000). *Las Pailas geothermal area Rincón de la Vieja volcano, Costa Rica* (pp. 267-284). En: Geothermal Training Programme. Reykjavík, Iceland UNU.
- Molina, F. (2009). *Modelo para zonificar el recurso geotérmico de alta entalpía aplicando técnicas geoespaciales, Las Pailas, Complejo Volcánico Rincón de la Vieja, Guanacaste Costa Rica*. (Tesis de Maestría inédita). Universidad Nacional de Costa Rica y Universidad de Costa Rica.
- Molina, F., y Martí, J. (2016). The Borinquen geothermal system (Cañas Dulces caldera, Costa Rica). *Geothermics*, 64, pp. 410-425.
- Montero, W.; Denyer, P.; Barquero, R.; Alvarado, G.; Cowan, H.; Dart, R. y Machette, M., (1998). *Mapa de fallas y pliegues cuaternarios de Costa Rica proyecto internacional de la litosfera*. San José, CR. UCR.
- Mottl, M. (1983). Metabasalts, axial hot springs, and the structure of hydrothermal systems at mid-ocean ridges. *Geol Soc Am Bull.*, 94(2), pp. 161-180. doi: 10.1130/0016-7606.
- Moya, P.; Mainieri, A. y Yock, A. (2002). *Development of the energy in Costa Rica* (pp. 365-384). En: Geothermal Energy Resources for Developing Countries. Netherlands Balkema Publishers.
- Muffler, P. y Cataldi R. (19789). Methods for regional assessment of geothermal resources. *Geothermics*, 7, pp. 53-89.
- Nicholson, K. (1993). *Geothermal fluids: chemistry and exploration techniques*. Berlin, Alemania Springer.
- Noorollahi, Y.; Itoi, R.; Fujii, H. y Tanaka, T. (2007). GIS model for geothermal resource exploration in Akita and Iwate prefectures, northern Japan. *Computers y Geosciences*, 33. pp. 1008-1021.
- Norton, D. (1984). Theory of hydrothermal systems. *Rev. Earth Planet. Sci*, 12, pp. 155-177.
- Price, N. J. y Cosgrove, J. W. (1990). *Analysis of geological structures*. Cambridge, Reino Unido Cambridge University Press.

- Prol, R. (1996). *El calor de la tierra*. México DF. Fondo de Cultura Económica.
- Ramey, H.J., Horne, R.J., Kruger, P., Miller, F.G., Brigham, W.E. y Cook, J.W. (1993). *Eighteenth workshop on geothermal reservoir engineering: proceedings*. California, EE:UU : Stanford University.
- Reyes, A. (2000). *Petrology and mineral alteration in hydrothermal systems: from diagenesis to volcanic catastrophes*. En: Geothermal Training Programme. Reykjavík, Iceland UNU.
- Robert, W., Potter, I.I., y Brown, D. (1977). The Volumetric properties of aqueous sodium chloride solutions from 0° to 500°C at pressures up to 2000 bars based on a regression of available data in the literature. *Geological Survey Bulletin*, 1421-C.
- Sánchez, E. y Vallejos, O. (2000). *Practical uses of clay minerals at the Miravalles Geothermal Field, Costa Rica*. Trabajo presentado en Proceedings World Geothermal Congress, Kyushu, Japan.
- Stober, I., Fritzer, T., Obst, K. y Schulz, R. (2014). Deep geothermal energy application possibilities in Germany. Berlin, Alemania Ullrich Bruchmann.
- Tikhonov, A. (1950). The determination of electrical properties of deep layer of the Earth's crust. *Doklady Akademii Nauk SSR*, 73, pp. 295-297.
- Urzúa, L. (2008). *Integration of a preliminary one-dimensional MT analysis with geology and geochemistry in a conceptual model of the Ngatamariki*. (tesis de Maestría inédita). University of Auckland.
- Vogel, T., Patiño, L.C., Alvarado, G.E. y Gans, P.B. (2004). Silicic ignimbrites within the Costa Rican volcanic front: evidence for the formation of continental crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 226, pp. 149-159.
- West JEC. (2011). *Servicios de consultoría para la explotación racional y sostenible del campo geotérmico Las Pailas (volumen de tablas y figuras, reporte final)*. San José, C.R. BCIE e ICE.
- Wood, C.P. (1995). *Calderas and geothermal systems in the Taupo volcanic zone, New Zealand*. Trabajo presentado en World Geothermal Congress '95, Florence, Italy.
- Wright, P.; Nielson, D.; Ross, H.; Moore, J.; Adams, M. y Ward, S. (1989). Regional exploration for convective hydrothermal resources. *Geotherm. Sci. Technol.*, 2, pp. 69-124.
- Zamora, N., Méndez, J., Barahona, M. and Sjöbohm, L. (2004). *Volcano-estratigrafía asociada al campo de domos de Cañas Dulces, Guanacaste, Costa Rica*. Revista Geológica de América Central, (30), pp. 41-58.
- Zharkov, V. (1985). *Estructura interna de la tierra y los planetas*. Moscú, Rusia IR.