



UNIVERSITAT DE
BARCELONA

**Cartografía de los sabinares
de *Juniperus turbinata* Guss. en la reserva de la
biosfera de El Hierro (Islas Canarias)
mediante teledetección**

Sergio Campo Moreno

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

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

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

Programa de Doctorado de
Geografia, Planificaci3n Territorial y Gesti3n Ambiental

Facultat de Geografia i Hist3ria
Departament de Geografia



UNIVERSITAT DE
BARCELONA

Tesis doctoral

**Cartografía de los sabinares de
Juniperus turbinata Guss. en la reserva de la biosfera de
El Hierro (Islas Canarias) mediante teledetección**

Memoria para optar al grado de Doctor presentada por:

Sergio Campo Moreno

Directora de la tesis:
Dra. Montserrat Salvà Catarineu
Universitat de Barcelona

Barcelona, septiembre de 2018

Fotografías de la portada:
Imagen del GeoEye-1 de Las Playas (octubre de 2011).
Detalles de las hojas y frutos del Juniperus turbinata (abril 2010, diciembre 2014).

Fotografía de la contraportada:
Imagen del GeoEye-1 de Taibique (octubre de 2011).

FINANCIACIÓN.

Este estudio ha sido financiado por los proyectos de investigación JUNITUR (CSO2011-24425, 2012-2015) “Biogeografía de los sabinares de *Juniperus turbinata* Guss. en la reserva de la biosfera de El Hierro y en el Parque Nacional de Doñana” de la Secretaría de Estado de Investigación del Ministerio de Ciencia e Innovación, y JUNITUR+ (CSO2015-68500-R MINECO/FEDER, UE, 2016-2019) “Bioclimatología y biodiversidad de los sabinares de *Juniperus turbinata* Guss. en La Palma y El Hierro” de la Secretaría de Estado de Investigación, Desarrollo e Innovación del Ministerio de Economía y Competitividad.



JUNITUR

A mi madre, a Laura y a Rose.

AGRADECIMIENTOS.

Esta tesis ha sido posible gracias al apoyo de diversas personas, que de una manera continua o puntual me han ayudado con sus consejos y opiniones. En primer lugar, quiero manifestar mi agradecimiento a mi directora de tesis, Dra. Montserrat Salvà Catarineu, por su seguimiento, sugerencias y correcciones en la elaboración de esta investigación. Pero antes, recordar, que fue gracias a su ofrecimiento de participar en el proyecto JUNITUR lo que motivó mi interés por realizar este estudio. También mi reconocimiento por su paciencia y guía en los momentos más complicados.

Al profesor Ferran Salvador Franch quiero agradecer sus aportaciones, tanto en consejos y aclaraciones como por sus conocimientos que me ha transmitido, además de su contribución en la obtención de datos de campo y de la AEMET.

En la realización de esta investigación he compartido muchos momentos con los integrantes del Servei de Gestió i Evolució del Paisatge de la Universitat de Barcelona, como Francesc Vilar y José Luis Ramírez. Quiero agradecer particularmente a Miriam Domínguez sus comentarios y conversaciones sobre SIG, teledetección y sobre el estudio del sabinar.

Agradecer a todos los profesores de los cursos de Máster y Doctorado que me mostraron nuevas aplicaciones en SIG. También al Dr. Antonio Gómez Ortiz, a la Dra. Isabel Pujadas y al Dr. Fernando Gil sus ánimos y consejos que me transmitieron para finalizar la tesis.

Agradecer el apoyo de las personas del Cabildo Insular de El Hierro por las facilidades dadas para la obtención de datos en el trabajo de campo.

Durante estos años de elaboración de la tesis, con momentos complicados e incluso de desánimo, quiero agradecer a dos personas del ámbito familiar que me han animado de forma constante, me refiero a mi hermana Laura y a mi sobrina Rose. Gracias por vuestra confianza, comprensión y optimismo. Sin vuestra actitud positiva y cariño no hubiese sido posible realizar esta tesis. Finalmente, y en este caso muy especial, a mi madre que siempre confió en mí.

Barcelona, septiembre 2018.

RESUMEN.

Los sabinares de *Juniperus turbinata* Guss. más extensos del archipiélago canario se encuentran en El Hierro, la isla más sudoccidental. La orografía de la isla es abrupta siendo la cima más alta el Malpaso con 1.501 m. Los vientos alisios tienen una influencia desde la vertiente septentrional hasta la meridional. La combinación de los vientos alisios del noreste y la topografía de la isla producen nubosidad en cotas medias y altas la mayoría de los días del año.

El género *Juniperus* es un taxón protegido en la legislación europea, en la española y en diversas comunidades autónomas entre las que se encuentra Canarias. Los avances en teledetección permiten disponer de imágenes de gran resolución, haciendo posible delimitar con más precisión la superficie de los sabinares, aumentando la fiabilidad de aquellas zonas poco accesibles, además de ser una alternativa ante la dificultad del trabajo de campo. Se han realizado estudios sobre la biodiversidad de los sabinares de la isla de El Hierro, el estado actual de sus poblaciones, su capacidad de regeneración, su posible regresión y las actuaciones a seguir para favorecer su conservación, pero no a partir de imágenes de satélite de muy alta resolución.

El objetivo principal de este trabajo fue la elaboración de la cartografía de *Juniperus turbinata* Guss. en la isla de El Hierro a partir de imágenes del GeoEye-1 y determinar la superficie y la densidad de individuos.

Como la obtención de imágenes de satélite produce distorsiones geométricas, están afectadas por la atmósfera y por el relieve, se realizaron las correcciones geométricas y radiométricas, que debido a las características de la isla fueron bastante laboriosas. Se ha utilizado un procedimiento empírico basado en funciones de transformación polinómica para la corrección geométrica, el método del objeto oscuro de Chávez para la atmosférica y los métodos no lambertianos de corrección C y empírico-estadístico para la topográfica, siendo el primero el que homogeniza mejor los valores de reflectividad entre las zonas más y menos iluminadas. Se calcularon diferentes índices de vegetación, siendo el MSAVI y el MSR los que proporcionaron mejores resultados. Por fuentes históricas se sabe que la extensión de la sabina había sido mayor, pero debido a factores antrópicos y ambientales se ha reducido considerablemente su superficie. Los resultados de esta investigación permitieron conocer su extensión, con una ocupación muy inferior a su potencial área de ocupación y constatando la recesión de sabina, la densidad total (7,84% para el MSAVI, 8,53% para el MSR y 7,39% para el SAVI), la presencia en función del tipo de sabinar, siendo el húmedo el que presenta mayor superficie de *Juniperus turbinata*, y la elevación. Esta información es fundamental para elaborar estrategias de gestión para su conservación y regeneración.

ABSTRACT.

The *Juniperus turbinata* Guss. junipers, most extensive of the canarian archipelago, are located in El Hierro, it is the most sub-western island. The orography of the island is abrupt, with the highest summit being the Malpaso with 1,501 m. The trade winds have an influence from the northern slope to the southern one. The combination of the trade winds of the northeast and the topography of the island produces cloudiness in medium and high levels most days of the year.

The genus *Juniperus* is a protected taxon in European legislation, in the Spanish and in various autonomous communities (Canary Islands and Andalusia). The advances in remote sensing allow images of great resolution, making it possible to delimit with more precision the surface of the junipers, increasing the reliability of those inaccessible areas. In addition, they are an alternative before the difficulty of the field work. Studies have been carried out on the biodiversity of the junipers on the island of El Hierro, the current state of their populations, their capacity for regeneration, their possible regression and the actions to be taken to promote their conservation, but not from very high resolution satellite images.

The main objective of this work was the elaboration of the cartography of *Juniperus turbinata* Guss., in the island of El Hierro, from GeoEye-1 images, and to determine the surface and density of individuals.

As the obtaining of satellite images produces geometric distortions, they are affected by the atmosphere and by the relief, for that reason the geometric and radiometric corrections were made, which due to the characteristics of the island have been quite laborious. An empirical procedure based on polynomial transformation functions has been used for geometric correction, the Chavez dark object method for atmospheric and non-Lambertian methods for C-correction and empirical-statistical correction for topography, the first being the one that homogenizes best reflectivity values between the most and least illuminated areas. Different vegetation indexes were calculated, being the MSAVI and the MSR that provided the best results. Through historical sources it is known that its extension had been greater, but due to anthropic and environmental factors its surface has been considerably reduced. The results of this investigation allowed to know its total extension, with an occupation much lower than its potential occupation area and noting the recession of sabina, the density (7,84% for the MSAVI, 8,53% for the MSR and 7,39% for the SAVI) and its presence depending on the type of juniper, the wet one being it has a greater surface area of *Juniperus turbinata*, and elevation. This information is essential to develop management strategies for its conservation and regeneration.

ÍNDICE.

RESUMEN.....	XI
LISTADO DE FIGURAS.....	XVII
LISTADO DE TABLAS.....	XXIII
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. INTRODUCCIÓN.....	3
1.2. OBJETIVOS.....	6
1.3. ESTRUCTURA DE LA TESIS.....	7
2. ÁREA DE ESTUDIO	9
2.1. SITUACIÓN.....	11
2.2. CLIMA.....	12
2.3. GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA.....	18
2.4. HIDROLOGÍA.....	22
2.5. VEGETACIÓN.....	23
2.5.1. EL SABINAR.....	24
3. FUNDAMENTOS DE TELEDETECCIÓN.....	29
3.1. INTRODUCCIÓN.....	31
3.2. RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA.....	31
3.3. ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO.....	33
3.4. INTERACCIÓN ATMÓSFERA-RADIACIÓN.....	35
3.4.1. ABSORCIÓN.....	36
3.4.2. DISPERSIÓN.....	37
3.4.3. EMISIÓN.....	37
3.4.4. REFRACCIÓN.....	38
3.4.5. DIFRACCIÓN.....	39
3.5. INTERACCIÓN RADIACIÓN-CUBIERTA TERRESTRE.....	39
3.6. FIRMAS ESPECTRALES: VEGETACIÓN, SUELO Y AGUA.....	41
3.6.1. CUBIERTA VEGETAL.....	41
3.6.2. SUELO.....	42
3.6.3. AGUA.....	42

4. PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES DE.....	43
4.1. INTRODUCCIÓN.....	45
4.2. MATERIAL.....	46
4.2.1. ADQUISICIÓN DE IMÁGENES.....	46
4.2.2. SELECCIÓN DE IMÁGENES.....	46
4.2.3. CARACTERÍSTICAS DEL SATÉLITE GEOEYE-1.....	47
4.2.4. PUNTOS DE CONTROL.....	48
4.3. CORRECCIÓN GEOMÉTRICA.....	49
4.3.1. INTRODUCCIÓN.....	49
4.3.2. METODOLOGÍA.....	51
4.3.2.1. Puntos de control.....	52
4.3.2.2. Función de transformación.....	54
4.3.2.3. Funciones de transferencia.....	55
4.3.2.4. Validación.....	57
4.3.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	57
4.4. CORRECCIONES RADIOMÉTRICAS.....	62
4.4.1. CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA.....	64
4.4.1.1. Introducción.....	64
4.4.1.2. Metodología.....	67
A) Método del objeto oscuro.....	67
B) Radiancias y reflectividades.....	68
C) Comparativa.....	70
4.4.1.3. Resultados y discusión.....	70
A) Radiancias.....	70
B) Números digitales (ND) mínimos.....	71
C) Reflectividades.....	73
4.4.2. CORRECCIÓN TOPOGRÁFICA.....	75
4.4.2.1. Introducción.....	75
4.4.2.2. Metodología.....	79
A) Modelo digital de elevaciones (MDE).....	79
B) Iluminación.....	79
C) Reflectividades.....	80
C.1) Corrección C.....	80
C.2) Corrección Empírico-Estadística.....	81
D) Validación.....	81
4.4.2.3 Resultados y discusión.....	82
A) Método de corrección C y Empírico-Estadístico.....	82
B) Validación.....	87

5. ÍNDICES DE VEGETACIÓN.....	93
5.1. INTRODUCCIÓN.....	95
5.2. METODOLOGÍA.....	98
5.2.1. CÁLCULO DE LOS ÍNDICES DE VEGETACIÓN.....	98
5.2.1.1. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI).....	99
5.2.1.2. Renormalized Difference Vegetation Index (RDVI).....	99
5.2.1.3. Modified Simple Ratio (MSR).....	100
5.2.1.4. Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI).....	100
5.2.1.5. Wide Dynamic Range Vegetation Index (WDRVI).....	101
5.2.1.6. Linearization of Normalized Difference Vegetation Index (LNDVI).....	101
5.2.1.7. Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI).....	102
5.2.1.8. Modified Soil Adjusted Vegetation Index (MSAVI).....	103
5.2.1.9. Optimization Soil Adjusted Vegetation Index (OSAVI).....	104
5.2.2. AJUSTES DE LOS ÍNDICES DE VEGETACIÓN.....	104
5.2.3. COMPARATIVA ENTRE ÍNDICES DE VEGETACIÓN (IV).....	105
5.2.3.1. Fracción de cobertura vegetal (f_c).....	106
5.2.3.2. Leaf area index (LAI).....	106
5.2.3.3. Raíz del error cuadrático medio (RMSE).....	108
5.2.3.4. Eficacia de los índices de vegetación.....	109
5.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	110
5.3.1. ÍNDICES DE VEGETACIÓN.....	110
5.3.2. AJUSTES DE LOS ÍNDICES DE VEGETACIÓN.....	113
5.3.3. FRACCIÓN DE COBERTURA VEGETAL (f_c).....	113
5.3.3.1. Eficacia de los índices de vegetación.....	119
5.3.4. LEAF AREA INDEX (LAI).....	120
5.3.4.1. Eficacia de los índices de vegetación.....	126
6. CARTOGRAFÍA DE <i>Juniperus turbinata</i>	131
6.1. CARTOGRAFÍA DE LAS SABINAS.....	133
6.2. RANGO DE REFLECTIVIDADES.....	134
6.2.1. DENSIDAD.....	142
6.3. FIRMAS ESPECTRALES.....	147
6.4. VALIDACIÓN A PARTIR DE LA DENSIDAD.....	152
6.5. COMPARATIVA.....	155
7. CONCLUSIONES/FINAL REMARKS.....	161
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	171

ANEXOS.....	209
ANEXO A. Parámetros del GeoEye-1 (Ampliación de los datos de la tabla 4.2.)	211
ANEXO B. Índices de vegetación	212
ANEXO C. Definición del tipo de hábitat según el Manual de interpretación de los hábitats de la Unión Europea, versión EUR 28 (2013).....	214
ANEXO D. Distancia Tierra-Sol.....	215
ANEXO E. Coordenadas de los puntos de control (GCP)	217
ANEXO F. Listado de abreviaturas y acrónimos.....	222

LISTADO DE FIGURAS.

- Figura 1.1. Esquema estructural de la tesis.
- Figura 2.1. Mapa de situación de la isla de El Hierro a partir de la ortofotografía.
- Figura 2.2. Esquema en sección de los alisios superior e inferior.
- Figura 2.3. Dirección de los vientos alisios. El área sombreada corresponde a la zona de presencia de las nubes. La línea discontinua es la zona si las nubes superan las cumbres.
- Figura 2.4. Climogramas de las estaciones de Sabinosa y San Andrés.
- Figura 2.5. Climograma en la estación de El Hierro-Aeropuerto (32 m), para el periodo 1981-2010.
- Figura 2.6. Mapa climático de El Hierro.
- Figura 2.7. Incremento de la precipitación media anual con la altura. Descenso de la temperatura media anual con la altura.
- Figura 2.8. Mapa pluviométrico de El Hierro.
- Figura 2.9. Distribución de las estaciones de los proyectos JUNITUR y JUNITUR+. Sensor de temperatura y humedad del suelo y termohigrómetro del aire.
- Figura 2.10. Cronología de la formación de la isla de El Hierro.
- Figura 2.11. Deslizamientos laterales en la isla de El Hierro.
- Figura 2.12. Mapa geológico de El Hierro.
- Figura 2.13. Sabinar de La Dehesa y sabinar de El Julan.
- Figura 2.14. *Juniperus turbinata* en La Dehesa, pino canario en El Julan, faya, laurisilva y fayal-brezal.
- Figura 3.1. Onda electromagnética propagándose en un medio homogéneo e isótropo.
- Figura 3.2. Espectro electromagnético.
- Figura 3.3. Transmitancia de la atmósfera y ventanas atmosféricas.
- Figura 3.4. Emitancia espectral de un cuerpo negro a diferentes temperaturas.
- Figura 3.5. Emitancia de un cuerpo negro a 6000 K, irradiancia solar exoatmosférica y la emitancia a temperatura terrestre y para mayor temperatura.
- Figura 3.6. Interacción entre la cubierta terrestre y la radiación incidente.

- Figura 3.7. Comportamiento reflectivo.
- Figura 3.8. Firmas espectrales para distintas cubiertas.
- Figura 3.9. Factores que explican la reflectividad de la hoja.
- Figura 4.1. Diagrama de la metodología del procesamiento de las imágenes GeoEye-1.
- Figura 4.2. GeoEye-1.
- Figura 4.3. Imagen Norte y Sur del GeoEye-1. Zona donde hay presencia de nubes.
- Figura 4.4. Zona húmeda y seca del sabinar de *Juniperus* del mapa de Del Arco *et al.* (2010) con la base de la ortofotografía del PNOA. MDE del PNOA.
- Figura 4.5. Diagrama de flujo de la corrección geométrica.
- Figura 4.6. Transformaciones según el orden del polinomio.
- Figura 4.7. Método de interpolación para el ajuste según el vecino más próximo.
- Figura 4.8. Ajuste a partir del método del vecino más próximo.
- Figura 4.9. Método de interpolación bilineal y método de interpolación según convolución cúbica.
- Figura 4.10. Representación de puntos de control. En verde la posición en la imagen de referencia y en rojo la posición en la imagen Geoeye-1. Imagen de referencia. Imagen GeoEye-1.
- Figura 4.11. Representación de puntos de control al aplicar una transformación polinómica.
- Figura 4.12. Vectores de error planimétrico antes de aplicar una transformación. Transformación de primer grado (negro), de segundo grado (azul) y de tercer grado (rojo). Localización en El Hierro.
- Figura 4.13. Puntos independientes donde se han realizado las medidas del error. La Dehesa. Sabinosa.
- Figura 4.14. Comparación entre el error medio (MS) y el error cuadrático medio (RMS) para diferentes polinomios de transformación para la Zona A. Variación del RMS en función del número de puntos de control.
- Figura 4.15. Efectos atmosféricos sobre el cálculo de la reflectividad.
- Figura 4.16. Cálculo simplificado de la reflectividad.
- Figura 4.17. Proceso metodológico de la obtención de la reflectividad.
- Figura 4.18. Histogramas de las bandas 1 a 4, correspondientes a las imágenes Norte y Sur.

- Figura 4.19. Valores atribuidos a la dispersión atmosférica de los histogramas de las bandas 1 a 4 correspondientes a las imágenes Norte y Sur.
- Figura 4.20. Valor mínimo para la banda 2 de la imagen Norte.
- Figura 4.21. Valores de reflectividad aparente media y de la reflectividad media con corrección para la imagen 4 y 5.
- Figura 4.22. Valores de reflectividad de la isla de El Hierro correspondientes a la banda 3 al aplicar la corrección atmosférica.
- Figura 4.23. Efecto topográfico.
- Figura 4.24. Efecto del relieve sobre la radiancia detectada por el sensor.
- Figura 4.25. Proceso metodológico de la corrección topográfica.
- Figura 4.26. Zonas en las cuales se ha determinado c_k .
- Figura 4.27. Comparativa entre los valores de reflectividad antes (Q_{sn} , Q_{ss}) y después de aplicar la corrección C (Q_{cn} , Q_{cs}) para la imagen Norte y Sur. Valores de reflectividad para la zona 3 antes (Q_{3s}) y después (Q_{3c}) de la corrección.
- Figura 4.28. Comparativa entre los valores de reflectividad antes (Q_{sn} , Q_{ss}) y después de aplicar la corrección Empírico-Estadística (Q_{cn} , Q_{cs}) para la imagen Norte y Sur. Valores de reflectividad para la zona 3 antes (Q_{3s}) y después (Q_{3c}) de la corrección.
- Figura 4.29. MDE. Pendientes. Iluminación. Composición 432 sin corrección topográfica, después de aplicar el método de corrección C y el método Empírico-Estadístico.
- Figura 4.30. Desviación estándar para la imagen Norte con θ_i de $32,9^\circ$ y Sur con θ_i de $36,3^\circ$, con y sin corrección topográfica.
- Figura 4.31. Estabilidad radiométrica a partir del RDMR después de la corrección topográfica. EE(S) es el método Empírico-Estadístico en la parte Sur, EE(N) en la parte Norte, SC(S) es el método de corrección C en la parte Sur y SC(N) en la parte Norte.
- Figura 4.32. Relaciones lineales entre la reflectividad en las bandas 3 y 4, y la iluminación ($\cos \gamma_i$) antes y después de la corrección topográfica: (A_{B3}) y (A_{B4}) antes de la corrección, (B_{B3}) y (B_{B4}) con corrección C, (C_{B3}) y (C_{B4}) con corrección Empírico-Estadística.
- Figura 5.1. Ramas y hojas del *Juniperus turbinata*.
- Figura 5.2. Interacción de la radiación en una hoja.
- Figura 5.3. Esquema de la metodología para la localización de *Juniperus turbinata*.
- Figura 5.4. Isolíneas de vegetación en función de la banda del IRC y del rojo para los

índices NDVI y PVI. El punto A representa una cubierta sobre suelo seco, el punto B el comportamiento espectral cuando se humedece la cubierta según el índice NDVI y el punto C según el índice PVI.

- Figura 5.5. Localización de *Juniperus turbinata* de control para la obtención del LAI.
- Figura 5.6. Interacciones de la radiación en función de la orientación de la hoja. Hojas del *Juniperus turbinata*.
- Figura 5.7. Índices de vegetación en El Hierro.
- Figura 5.8. Valores máximos, mínimos, media y desviación estándar para los diferentes índices de vegetación.
- Figura 5.9. Valores de la fracción de cobertura vegetal para los índices de vegetación en el noroeste de El Hierro.
- Figura 5.10. Representación del índice de vegetación y la fracción de cobertura vegetal en la zona de La Dehesa.
- Figura 5.11. Representación del índice de vegetación y la fracción de cobertura vegetal para la sabina.
- Figura 5.12. Valores de la raíz del error cuadrático medio de la fracción de cobertura vegetal para los índices de vegetación en los puntos de control del *Juniperus turbinata*.
- Figura 5.13. Sensibilidad de los diferentes índices de vegetación según el modelo *Noise Equivalent* (NE) para la f_c en los puntos de control de sabina.
- Figura 5.14. Representación de la función exponencial entre el LAI y el índice de vegetación.
- Figura 5.15. Valores máximos, medios y de saturación para el LAI y el índice de vegetación.
- Figura 5.16. Valores del LAI para los índices de vegetación en el sabinar de La Dehesa.
- Figura 5.17. Valores de la raíz del error cuadrático medio del LAI para los índices de vegetación en los puntos de control del *Juniperus turbinata*.
- Figura 5.18. Representación de la función lineal entre el LAI y el índice de vegetación para el *Juniperus turbinata*.
- Figura 5.19. Sensibilidad de los diferentes índices de vegetación según el modelo *Noise Equivalent* (NE) para el LAI en los puntos de control de sabina.
- Figura 6.1. Distribución del sabinar seco y húmedo a partir de Del Arco *et al.* (2006).
- Figura 6.2. Comparativa de los tres índices de vegetación para el sabinar seco y húmedo.
- Figura 6.3. Localización de *Juniperus turbinata* a partir del MSAVI en La Dehesa.

Comparativa con el mapa de sabinar de Del Arco *et al.* (2006).

- Figura 6.4. Localización de *Juniperus turbinata* a partir del MSAVI en Las Playas. Comparativa con el mapa de sabinar de Del Arco *et al.* (2006).
- Figura 6.5. Localización de *Juniperus turbinata* a partir del MSAVI en Sabinosa. Comparativa con el mapa de sabinar de Del Arco *et al.* (2006).
- Figura 6.6. Localización de *Juniperus turbinata* a partir del MSAVI en El Julan. Comparativa con el mapa de sabinar de Del Arco *et al.* (2006).
- Figura 6.7. Localización de *Juniperus turbinata* a partir del MSR en La Dehesa. Comparativa con el mapa de sabinar de Del Arco *et al.* (2006).
- Figura 6.8. Localización de *Juniperus turbinata* a partir del MSR en Las Playas. Comparativa con el mapa de sabinar de Del Arco *et al.* (2006).
- Figura 6.9. Localización de *Juniperus turbinata* a partir del MSR en Sabinosa. Comparativa con el mapa de sabinar de Del Arco *et al.* (2006).
- Figura 6.10. Localización de *Juniperus turbinata* a partir del MSR en El Julan. Comparativa con el mapa de sabinar de Del Arco *et al.* (2006).
- Figura 6.11. Localización de *Juniperus turbinata* a partir del SAVI en La Dehesa. Comparativa con el mapa de sabinar de Del Arco *et al.* (2006).
- Figura 6.12. Localización de *Juniperus turbinata* a partir del SAVI en Las Playas. Comparativa con el mapa de sabinar de Del Arco *et al.* (2006).
- Figura 6.13. Localización de *Juniperus turbinata* a partir del SAVI en Sabinosa. Comparativa con el mapa de sabinar de Del Arco *et al.* (2006).
- Figura 6.14. Localización de *Juniperus turbinata* a partir del SAVI en El Julan. Comparativa con el mapa de sabinar de Del Arco *et al.* (2006).
- Figura 6.15. Densidad de *Juniperus turbinata* en La Dehesa según los índices de vegetación: MSAVI, MSR y SAVI.
- Figura 6.16. Densidad de *Juniperus turbinata* en El Julan según los índices de vegetación: MSAVI, MSR y SAVI.
- Figura 6.17. Densidad de *Juniperus turbinata* en Sabinosa según los índices de vegetación: MSAVI, MSR y SAVI.
- Figura 6.18. Densidad de *Juniperus turbinata* en Las Playas según los índices de vegetación: MSAVI, MSR y SAVI.
- Figura 6.19. Localización de puntos de control sobre una composición 432.
- Figura 6.20. Valores medios de la reflectividad de B1, B2, B3 y B4 en los puntos de muestra.

- Figura 6.21. Primera derivada del espectro de reflectividades.
- Figura 6.22. Localización de las áreas de una hectárea donde se ha determinado la densidad. Detalle de la zona A12 de la banda 3 y de la ortofotografía.
- Figura 6.23. Regresión lineal entre la densidad de *Juniperus turbinata* y los índices de vegetación: MSAVI en el Julan, MSR en El Julan, TRVI en El Julan, MSAVI en La Dehesa, MSR en La Dehesa, TRVI en La Dehesa.
- Figura 6.24. Cartografía de las sabinas en El Hierro obtenida con el índice MSAVI a partir de un rango representativo de reflectividades.
- Figura 6.25. Cartografía de las sabinas en El Hierro obtenida con el índice MSR a partir de un rango representativo de reflectividades.
- Figura 6.26. Cartografía de las sabinas en El Hierro obtenida con el índice SAVI a partir de un rango representativo de reflectividades.
- Figura 6.27. Cartografía de las sabinas en El Hierro obtenida con el índice MSAVI a partir de la firma espectral de imágenes GeoEye-1.
- Figura 6.28. Cartografía de las sabinas en El Hierro obtenida con el índice MSR a partir de la firma espectral de imágenes GeoEye-1.
- Figura A. Vista esquemática de los elementos del sistema de suelo GeoEye-1.

LISTADO DE TABLAS.

- Tabla 2.1. Precipitaciones medias mensuales y anuales. Temperaturas medias mensuales y anuales.
- Tabla 2.2. Recursos y consumos hidrológicos ($m^3/año$).
- Tabla 3.1. Características de las ondas electromagnéticas.
- Tabla 4.1. Principales datos de las imágenes GeoEye-1.
- Tabla 4.2. Principales parámetros del GeoEye-1 para una órbita de 681 km.
- Tabla 4.3. Relación de las imágenes GeoEye-1 y sus dimensiones.
- Tabla 4.4. Funciones para el método del vecino más próximo, siendo $f(x,y)$ el ND de la celda (x,y) de la imagen original, $f(a,b)$ el ND de la celda (a,b) de la imagen corregida.
- Tabla 4.5. Grado del polinomio, error cuadrático medio y función de ajuste para cada imagen.
- Tabla 4.6. Resultados del error medio (MS) y del error cuadrático medio (RMS) y la relación entre el error de corrección y el de ajuste.
- Tabla 4.7. Resultados del error medio (MS) y del error cuadrático medio (RMS), y la relación entre el error de corrección y el de ajuste en función del grado del polinomio para la Zona A.
- Tabla 4.8. Valores K_{nTDI} , ancho de banda, ganancia y sesgo.
- Tabla 4.9. Valores de la radiancia donde sólo hay contribución de la atmósfera para la imagen Norte (negro) y Sur (azul).
- Tabla 4.10. Valores de la distancia Tierra-Sol y del ángulo cenital solar.
- Tabla 4.11. Valores de la irradiancia exoatmosférica y de transmisión atmosférica en el camino Sol-Tierra.
- Tabla 4.12. Reflectividades medias aparentes, corregidas y SD de las reflectividades aparentes.
- Tabla 4.13. Estadísticas del MDE, la pendiente, la orientación y la iluminación.
- Tabla 4.14. Valores de la regresión lineal y del coeficiente c_k para la imagen Norte.
- Tabla 4.15. Valores de la regresión lineal y del coeficiente c_k para la imagen Sur.
- Tabla 4.16. Valores medios de reflectividad (ρ_m) corregidos para la imagen Norte y Sur para el método de corrección C.

- Tabla 4.17. Relación entre las bandas 4 y 3 de los valores medios de reflectividad (Q_m) corregidos para la imagen Norte y Sur para el método de corrección C.
- Tabla 4.18. Valores medios de reflectividad (Q_m) corregidos para la imagen Norte y Sur para el método Empírico-Estadístico.
- Tabla 4.19. Relación entre las bandas 4 y 3 de los valores medios de reflectividad (Q_m) corregidos para la imagen Norte y Sur para el método Empírico-Estadístico.
- Tabla 4.20. Desviación estándar para la imagen del Norte de la isla y para el Sur, aplicando correcciones topográficas y sin aplicar.
- Tabla 4.21. Desviación estándar en % en comparación con las imágenes sin corregir.
- Tabla 4.22. Índices de dispersión en % para las diferentes bandas antes y después de las correcciones.
- Tabla 4.23. Medidas de evaluación de los dos métodos de corrección topográfica para la imagen Norte a partir de la prueba t . Reflectividades medias de los puntos de control antes y después de la corrección topográfica.
- Tabla 4.24. Medidas de evaluación de los dos métodos de corrección topográfica para la imagen Sur a partir de la prueba t . Reflectividades medias de los puntos de control antes y después de la corrección topográfica.
- Tabla 5.1. Valores máximos y mínimos para los diferentes índices de vegetación en la imagen Norte y Sur, antes del ajuste ($Mín_1$ N, $Mín_1$ S) y después ($Mín_2$ N, $Mín_2$ S).
- Tabla 5.2. Parámetros estadísticos referidos a la regresión lineal $IV=a+b \cdot f_c$ en el noroeste de la isla. $IV_{máx}$ e $IV_{mín}$ son los valores para suelo y vegetación puros. SD es la desviación estándar.
- Tabla 5.3. Valores máximos y mínimos de fracción de cobertura vegetal para los diferentes índices de vegetación en sabina: a y b son los parámetros de la función $IV=a+b \cdot f_c$.
- Tabla 5.4. Resultados del coeficiente de Leprieur, RER y NE para los índices de vegetación en el rango de los valores de la f_c en los puntos de control del *Juniperus turbinata*. Coeficiente de Leprieur para la zona del sabinar.
- Tabla 5.5. Valores de LAI para los diferentes índices de vegetación.
- Tabla 5.6. Valores mejor ajustados de los parámetros en las relaciones LAI-IV y estadísticas. Los parámetros a y b corresponden a la función $IV=a-b \cdot e^{-k \cdot LAI}$
- Tabla 5.7. Valores de LAI para los diferentes índices de vegetación: a y b son los parámetros de la función $IV=a+b \cdot LAI$.
- Tabla 5.8. Resultados del coeficiente de Leprieur, RER y NE para los índices de vegetación en el rango de los valores del LAI en los puntos de control del *Juniperus turbinata*. Coeficiente de Leprieur* para la zona del sabinar.

- Tabla 5.9. Valores de la prueba-*t* para las diferentes bandas espectrales, calculados a partir de la reflectividad en los puntos de control.
- Tabla 5.10. Índices de vegetación que presentan los mejores resultados para el LAI y la fracción de cobertura vegetal en la sabina.
- Tabla 6.1. Rango de reflectividades (R_Q) y porcentaje de superficie (S) de la sabina para los índices de vegetación según el tipo de sabinar.
- Tabla 6.2. Porcentaje de la densidad para los índices de vegetación según el tipo de sabinar (S: seco, H: húmedo, P: con pinos).
- Tabla 6.3. Valores medios de reflectividad para cada banda de cada una de las especies en los puntos de estudio.
- Tabla 6.4. Valores medios de la derivada.
- Tabla 6.5. Densidad de *Juniperus turbinata* (árboles/ha) (D), valores máximos de reflectividades (Máx.), valores mínimos de reflectividades (Mín.), media (M) y desviación estándar (SD) en las parcelas de control. De A1 a A10 corresponde a La Dehesa y de A11 a A18 a El Julan.
- Tabla 6.6. Distribución de sabinas (%) en función del método utilizado para determinar el intervalo de reflectividades en el sabinar seco (S_s), húmedo (S_h) y con pinos (S_p).
- Tabla 6.7. Superficie (ha) de *Juniperus turbinata* en función del sabinar y del modelo. Distribución de sabinas (%) respecto al total del sabinar.
- Tabla 6.8. Densidad (nº de sabinas/hectárea) y porcentaje de coincidencia (C) para los índices de vegetación MSAVI y MSR.
- Tabla A. Principales parámetros del GeoEye-1.
- Tabla B. Índices de vegetación.
- Tabla C. Distancia Tierra-Sol en unidades astronómicas en función del día del año.
- Tabla D. GCP para la imagen Norte y Sur.

1. INTRODUCCIÓN

*“Un paisaje casi surrealista,
de ensueño, cercano a lo irreal
para quien lo visite por primera vez”.*

*Javier Estévez
(Gigantes en las Hespérides).*

1.1. INTRODUCCIÓN.

El objetivo principal de la teledetección es adquirir información a distancia de la superficie terrestre y de la atmósfera a partir de la radiación procedente de las mismas con el uso de sensores.

La dificultad o imposibilidad de acceder a determinados lugares, por ser zonas peligrosas, remotas o inaccesibles, hace que el trabajo de campo conlleve un gran coste económico y sea imposible de realizar en determinadas áreas. Una alternativa para las investigaciones es la adquisición de las imágenes que proporcionan los satélites (Cea *et al.*, 2007). Incluso en zonas donde es posible la obtención de datos de campo, las imágenes de satélite ofrecen la posibilidad de poder delimitar grandes superficies, además de proporcionar series temporales y permitir el análisis automatizado (Underwood *et al.*, 2003).

Las imágenes de satélite ofrecen una amplia cobertura espacial y presentan unos valores homogéneos (Lambin y Geist, 2006), aunque es en un momento determinado. Con los sensores de campo tenemos información de un punto (Cea *et al.*, 2007), pero en muchos momentos.

Las imágenes de satélite permiten constatar los cambios de las condiciones medioambientales y de las actividades humanas. Los sensores de los satélites captan energía con una longitud de onda fuera del espectro visible, lo que permite trabajar con información muy valiosa para estudios medioambientales. La disponibilidad de esta base de datos digital de imágenes multispectrales posibilita la comparación entre periodos (Rodríguez-Galiano *et al.*, 2012) y la creación de modelos predictivos a diferentes escalas temporales y espaciales (local, regional y global).

La utilización de imágenes de NOAA, Landsat, SeaSat, SPOT, MODIS, MOS-1, ERS-1, entre otros, hasta los más recientes como el ALOS, WoldView, GeoEye-1, EROS-C, ha generado una incorporación de más y mejores sensores, proporcionando más información. La puesta en órbita de estos satélites ha permitido obtener imágenes de diferente resolución espacial, espectral, radiométrica y temporal. Estas imágenes se han utilizado en diversos ámbitos, como la generación de modelos digitales de elevaciones (Toutin, 2004a), mapas topográficos (Holland *et al.*, 2006), cubiertas urbanas (Lu y Weng, 2009; Thomas *et al.*, 2003), evaluación del daño sísmico (Miura y Midorikawa, 2006), etc.

Actualmente, diversos factores han contribuido a la divulgación de los datos que proporciona la teledetección. Es de destacar la mejora de los equipos informáticos en cuanto a capacidad de almacenamiento y velocidad de procesamiento. La evolución de internet tanto en velocidad como en capacidad de transmisión ha permitido la disponibilidad de imágenes de manera general. Este desarrollo en cuanto a la captura y

transmisión de datos ha hecho posible su uso en una gran diversidad de campos. La teledetección, como ciencia relacionada con el procesamiento de información geográfica, es parte de la geomática. Para poder gestionar, analizar y obtener datos geoespaciales, para crear mapas y optimizar los recursos ha sido imprescindible disponer de sistemas de información geográfica (SIG) como ArcGis, MiraMon e Idrisi. La relación entre la teledetección y los SIG se produce a tres niveles: los datos obtenidos por los satélites son procesados en SIG, la información que proporciona los datos SIG se utiliza para mejorar los productos que proporcionan los satélites, y para la elaboración y análisis se utiliza conjuntamente el SIG y la teledetección (Wilkinson, 1996).

El estudio de cubiertas vegetales se puede realizar mediante la teledetección ya que se obtienen valores biofísicos y bioquímicos como el clima (García y Allué, 2005) y los usos del suelo (Thuiller *et al.*, 2004; Gastón, 2006; Antrop, 2007), fundamentales para determinar la heterogeneidad del ecosistema y su evolución temporal (Kerr y Ostrovsky, 2003). Esta variación en el tiempo en el caso de la cubierta arbórea proporciona información de los cambios de la biodiversidad, el clima, los usos del suelo y de los ciclos hidrológicos y del carbono (Townshend *et al.*, 2012; Hansen *et al.*, 2013).

Se han realizado estudios sobre las cubiertas vegetales a diferentes escalas espaciales, locales (Everitt *et al.*, 2007), regionales (Hansen *et al.*, 2008) y globales (Thuiller *et al.*, 2003; Hansen *et al.*, 2003, 2010; Townshend *et al.*, 2012; Lehnert *et al.*, 2015). A nivel de detalle, la determinación de parámetros específicos se puede realizar a nivel de hoja. Se pueden estimar los pigmentos (clorofila, carotenoide, xantofila, antocianina) (Sims y Gamon, 2002; Ain-Lhout, 2004; Ustin *et al.*, 2009; Gitelson *et al.*, 2009, 2011) u otros componentes (agua, nitrógeno, proteínas, celulosa, lignina) (Smith *et al.*, 2003; Kokaly *et al.*, 2009; Rorie *et al.*, 2011), aportando información sobre el estado de las plantas, tipos de especies, distribución, fotosíntesis, etc. Para la estimación de cobertura arbórea¹ muchas veces es preciso aplicar tratamientos previos (Townshend *et al.*, 2012). Para estudios de grandes extensiones la teledetección es una herramienta para identificar y describir patrones del paisaje. Para ello se han desarrollado diversos métodos de clasificación: multiescala que comprende la generación de una representación de múltiples escalas y la extracción de información (Chen *et al.*, 2009), índices de vegetación, regresión lineal múltiple (Zhu y Evans 1994; DeFries *et al.*, 2000), modelado de mezcla lineal (Iverson *et al.*, 1989), regresión de árboles (Herold 2003; Sá *et al.*, 2003; Hansen *et al.* 2003, 2005; Donmez *et al.*, 2015), análisis subpíxel, algoritmos de desmezcla espectral (Stagakis *et al.*, 2016), análisis de mezcla espectral, espectroscopia de campo (Adam y Mutanga, 2009; Jiménez y Díaz-Delgado, 2015), análisis de mezcla espectral (Yang *et al.*, 2012), entre otros.

Para el estudio de bosques, las imágenes de media resolución se han utilizado para estudios a nivel regional y global (Gu *et al.* 2006, Hall *et al.* 2006, Maselli y Chiesi 2006; Hansen *et*

¹ Relación entre el área de suelo y la superficie de la proyección vertical de los árboles.

al., 2013; Travis *et al.*, 2018). En bosques densos mixtos, la delimitación de las especies es problemático debido a sus diferentes dimensiones, que originan diferentes capas del dosel, el sombreado dentro y entre las copas, y la posible confusión espectral. Se han utilizado diversos sistemas de detección remota, como láser (Tiede *et al.*, 2005; Asner *et al.* 2008), fotografías aéreas (Erikson *et al.*, 2005; Garzón-López *et al.*, 2012; Amaral *et al.*, 2015), radar (Beaudoin *et al.*, 1995; Kyun, 1997) y satélites (Asner *et al.* 2002; Somers y Asner, 2014). Con satélites que aportan imágenes de alta resolución se han realizado estudios para diferenciar especies aportando resultados en zonas con vegetación dispersa (Hájek, 2006; Everitt *et al.*, 2007; Arenas *et al.*, 2011). Estos estudios, a nivel de individuo, han considerado la longitud de la sombra, el diámetro de la copa o las firmas espectrales siempre que sean bosques dispersos donde la distancia entre árboles excede su altura (Gougeon *et al.*, 1998; Greenberg *et al.*, 2005; Song, 2007; Ozdemir, 2008). El uso de datos con alta resolución espacial, con el valor del píxel inferior al dosel del árbol, facilitan la localización a través de las copas de los árboles, pero no han sido tan precisos para la discriminación de especies (Nagendra y Rocchini, 2008). El uso de sensores remotos para el estudio a nivel de individuo en bosques abiertos puede ser rentable para estimar determinadas características.

En esta investigación se analiza la distribución de *Juniperus turbinata* Guss. en la isla de El Hierro mediante teledetección. El presente estudio pretende generar una cartografía que sirva como base para determinar la evolución temporal de los sabinares, creando datos de referencia y una localización exhaustiva del sabinar, realizando previamente las correcciones geométrica y radiométrica (Salvà-Catarineu *et al.*, 2018) y obteniendo datos precisos para la validación de los resultados.

Referente a la cubierta vegetal estudiada, la isla de El Hierro presenta cierta heterogeneidad de sabinares, con la laurisilva y el fayal-brezal en la parte norte, con jaras en el oeste y con el pino canario en el sur. En El Hierro el impacto antrópico relacionado con el incremento de tierras dedicadas al cultivo hizo disminuir la superficie de sabinares, sobre todo en áreas próximas a los núcleos de población. Los estudios más recientes sobre los sabinares (Del Arco *et al.*, 2006; Salvà-Catarineu *et al.*, 2012), constatan que el sabinar de El Hierro ocupa muy poca extensión de su área óptima en la isla. La obtención de valores ecológicos a partir del GeoEye-1 proporciona una valiosa información para determinar la dinámica de la vegetación, así como el análisis de especies invasoras, entre otros.

Se han cartografiado bosques de *Juniperus phoenicea* con imágenes satélite Landsat 7 y 8 a escala regional (Elmahdy y Mohamed, 2016; Sitayeb y Belabbes, 2018) a partir de índices de vegetación y SMV (Support Machine Vector), con imágenes de alta resolución (Everitt *et al.*, 2007, a partir de imágenes QuickBird distinguen el *Juniperus* de otras especies si se realiza en el IRC), y a nivel de individuo a partir de ortofotografías (García *et al.*, 2014, en Doñana) y fotografías aéreas (Díaz-Delgado, 2010, en Doñana). En Canarias, Bello *et al.*, 2016, mediante fotografías aéreas ha cartografiado *Juniperus phoenicea* en bosque abierto en La

Gomera, excluyendo las áreas que coexisten el *Juniperus turbinata* y el *Pinus halepensis*, y Campo y Salvà-Catarineu (2014) mediante imágenes GeoEye-1 de alta resolución han cartografiado a nivel de individuo cuando el crecimiento es aislado. Se han utilizado imágenes de satélite con una resolución de 20 m a partir del satélite SPOT-2 para clasificar la cubierta de El Hierro (Schweichel, 1999), pero no con alta resolución.

El género *Juniperus* está protegido por la CEE (Directiva 92/43/CEE, 9560 Bosques endémicos de *Juniperus sp.*). En El Hierro, según la altitud, se pueden distinguir cinco comunidades de vegetación: tabaibal dulce (inframediterráneo árido), el cardonal (inframediterráneo semiárido), el sabinar (infra- y termomediterráneo semiárido superior y termomediterráneo seco inferior), el monteverde (laurisilva; infra-, termo-, mesomediterráneo) y el pinar (termo- y mesomediterráneo) (Del Arco *et al.*, 2010). El *Juniperus turbinata* se encuentra en todas las islas Canarias occidentales (Adams *et al.*, 2014), pero es en La Gomera, El Hierro y Tenerife donde se encuentran las mayores extensiones, coexistiendo en determinadas zonas con la laurisilva y con el pino canario (Santos, 1976; Losada *et al.*, 1984; Gaisberg, 2005; Del Arco *et al.*, 2006; Nogales *et al.*, 2009). Es en El Hierro donde se encuentra la mayor extensión (Del Arco *et al.*, 2010; Romo *et al.*, 2014). Hay referencias que acreditan la recesión del sabinar (Del Arco *et al.*, 1999), ocupando unas 800 ha, lo que representa el 10% del área potencial (Stierstorfer, 2005; Gaisberg, 2005; Fernández-Palacios *et al.*, 2008). Actualmente, en El Hierro hay recuperación del sabinar y se detecta una dificultad de regeneración en los sectores más áridos de la isla (Salvà-Catarineu *et al.*, 2014a). En la cartografía de El Hierro a escala 1:20.000 del “Mapa de vegetación de Canarias” se describen tres tipos de sabinares: el sabinar seco, el sabinar húmedo y el sabinar con pinos. Este mapa se realizó a partir de ortofotografías (GRAFCAN) y de datos de campo obtenidos el 2001, constatando en esta cartografía que la extensión potencial del *Juniperus turbinata* sería mayor a la que ocupa actualmente (Del Arco *et al.*, 2006).

En teledetección, como se ha mencionado anteriormente, se han realizado diversos estudios sobre la discriminación de una especie, pero no con imágenes con una resolución como las del GeoEye-1 en bosques densos heterogéneos para el sabinar. En El Hierro (Canarias) encontramos zonas de la isla de difícil acceso, por ello, son de gran utilidad los sensores remotos para disponer de datos en el estudio de esta especie. Debido al valor histórico, paisajístico y biogeográfico de los sabinares de El Hierro, es relevante disponer de una metodología específica para cartografiar esta especie y poder analizar y gestionar su dinámica. En el presente trabajo se utilizan imágenes de satélite de muy alta resolución con bandas multispectrales de 2 m para cartografiar la distribución de *Juniperus turbinata*.

1.2. OBJETIVOS.

El objetivo principal de esta tesis es cartografiar los sabinares de *Juniperus turbinata* de la

isla de El Hierro y calcular su densidad mediante el tratamiento de imágenes de satélite de alta resolución. Esta propuesta se debe a que en Canarias los sabinares más extensos se encuentran en El Hierro, la isla más sudoccidental, con unas condiciones climáticas atlánticas extremas y con factores que dificultan la regeneración de la especie. Para ello se definen las siguientes hipótesis:

- La resolución de las imágenes del GeoEye-1 permite cartografiar con precisión los sabinares.
- Las imágenes del GeoEye-1 son necesarias para calcular la densidad de *Juniperus turbinata*.

A partir del objetivo general se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Generar imágenes con corrección geométrica y radiométrica.
- Analizar diversos índices de vegetación en los sabinares.
- Establecer diferencias espectrales a partir de la detección remota.
- Evaluar la eficacia de las imágenes del GeoEye-1 para discriminar especies.
- Determinar la densidad en función de las características propias de cada sabinar.
- Generar un mapa que muestre la distribución y abundancia del *Juniperus turbinata*.

1.3. ESTRUCTURA DE LA TESIS.

La presente tesis se estructura en seis capítulos y un apartado de referencias bibliográficas y otro de anexos, todos ellos con el propósito de cumplimentar los objetivos descritos anteriormente que motivan la realización de este estudio.

En el Capítulo 1 se enuncia el tema del estudio, se describe el estado de la cuestión y los objetivos que se acometen en esta tesis.

El Capítulo 2 presenta una descripción de la isla de El Hierro. Primero se detalla el contexto geográfico, y a continuación se describe a nivel climático, geológico y geomorfológico, hidrológico y de la vegetación, haciendo referencia a los datos de campo de temperatura y humedad. Todo ello con la finalidad de constatar la singularidad de esta isla declarada reserva de la biosfera y la influencia de estos factores en los sabinares, y en especial en el *Juniperus turbinata*.

El Capítulo 3 describe conceptos fundamentales de la teledetección, con el objetivo que faciliten una comprensión del elemento base de este estudio, que son las imágenes de satélite. En ningún caso es un estudio general de la teledetección, sino que se centra en

aspectos que clarifiquen los posteriores capítulos de este trabajo, por ello se hace referencia a la radiación y espectro electromagnético, su interacción con la atmósfera y a las firmas espectrales.

En el Capítulo 4 (figura 1.1.) se describe en primer lugar la adquisición y características de los materiales utilizados para la obtención de los resultados, haciendo referencia a las imágenes de satélite (GeoEye-1). A continuación, se expone su procesamiento referido a correcciones previas para su uso en la metodología aplicada.

En el Capítulo 5 se describe y analiza la metodología más idónea a partir de índices de vegetación en los sabinares. Se realiza una comparativa y se estudia su eficacia en las condiciones de El Hierro. A continuación, en el Capítulo 6 se aplican los resultados del capítulo anterior al *Juniperus turbinata* y se analiza su localización en los diferentes sabinares.

Las conclusiones se exponen en el Capítulo 7, haciendo referencia a los resultados obtenidos en cada uno de los apartados anteriores, y a posteriores líneas de investigación para la mejora de la cartografía del *Juniperus turbinata* en El Hierro. Finalmente, se relaciona las referencias bibliográficas consultadas, y en forma de anexos, los listados de datos utilizados.

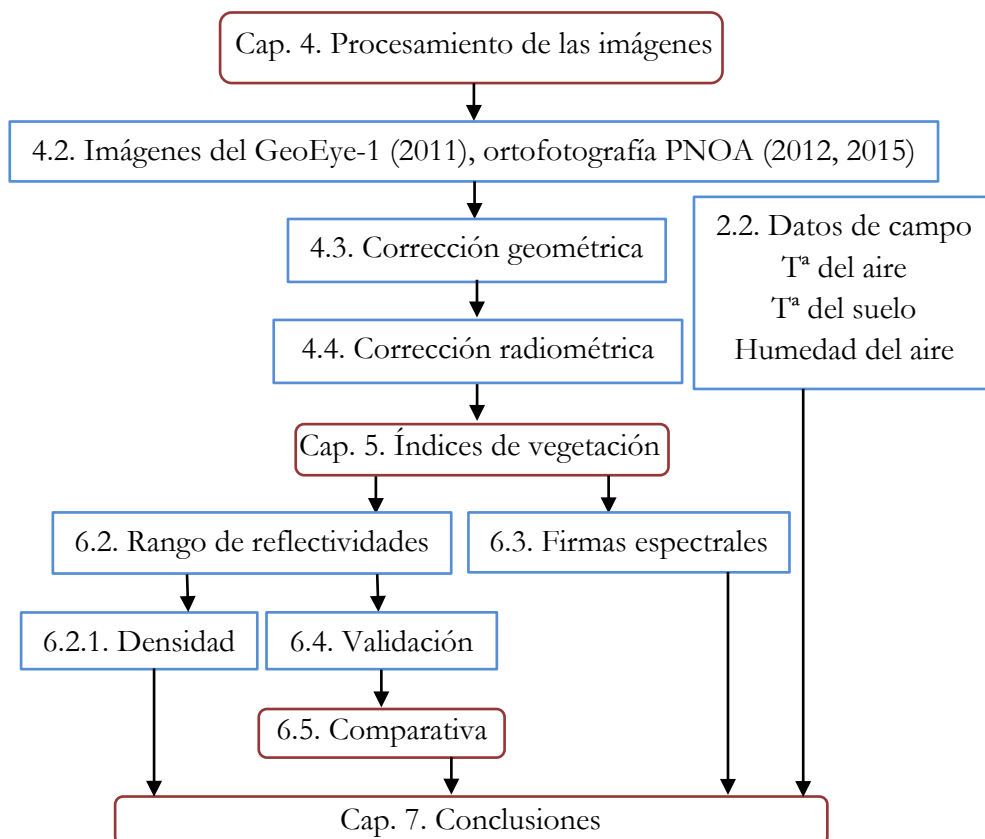


Figura 1.1. Esquema estructural de la tesis.

2. ÁREA DE ESTUDIO

*“- ¿Qué es un geógrafo?
-Es un sabio que conoce dónde se encuentran los mares,
los ríos, las ciudades, las montañas y los desiertos.
-Es bien interesante -dijo el principito-,
¡Por fin un verdadero oficio!”*

*Antoine de Saint-Exupéry
(El Principito).*

2.1. SITUACIÓN.

El origen etimológico de El Hierro se desconoce, aunque parece proceder de Esero, que es como los foráneos llamaban a la isla, o de Ferro (Ferrum-Fierro-Hierro), palabra de origen latino. Forma parte de las Islas del Medio Atlántico, junto con las Azores, Madeira y Cabo Verde, que se engloban a nivel biogeográfico bajo el término de Macaronesia. La isla tiene forma triangular, apuntando sus vértices al noreste, sur y noroeste.

La isla, perteneciente al Archipiélago Canario, se localiza en el extremo suroccidental, situándose entre los 27° 37' 33" norte y los 27° 51' 00" oeste (figura 2.1). En Punta de Orchilla se estableció en 1634 el meridiano 0 y se construyó el faro de Orchilla para marcar este punto, esto se mantuvo hasta el cambio al meridiano de Greenwich, por este motivo aún hoy se llama la isla del Meridiano. Como todo el Archipiélago, es de origen volcánico, siendo la isla más joven desde el aspecto geológico con 1,1 Ma (Guillou *et al.*, 1996), y la menor en extensión de las siete grandes islas con 287 km² (desde junio de 2018, La Graciosa es reconocida como la octava isla habitada, ya no es considerada islote). El Hierro alcanza su cumbre más elevada de Malpaso los 1.501 m, superando las cumbres de La Graciosa, Lanzarote, Fuerteventura y La Gomera, con la pendiente mayor de Canarias, estando cubierta de forma persistente por las nieblas de los alisios del noreste. La orografía es muy abrupta, produciéndose un rápido ascenso desde la costa hasta el Malpaso. El terreno es muy poroso, y no se encuentran cursos continuos de agua.

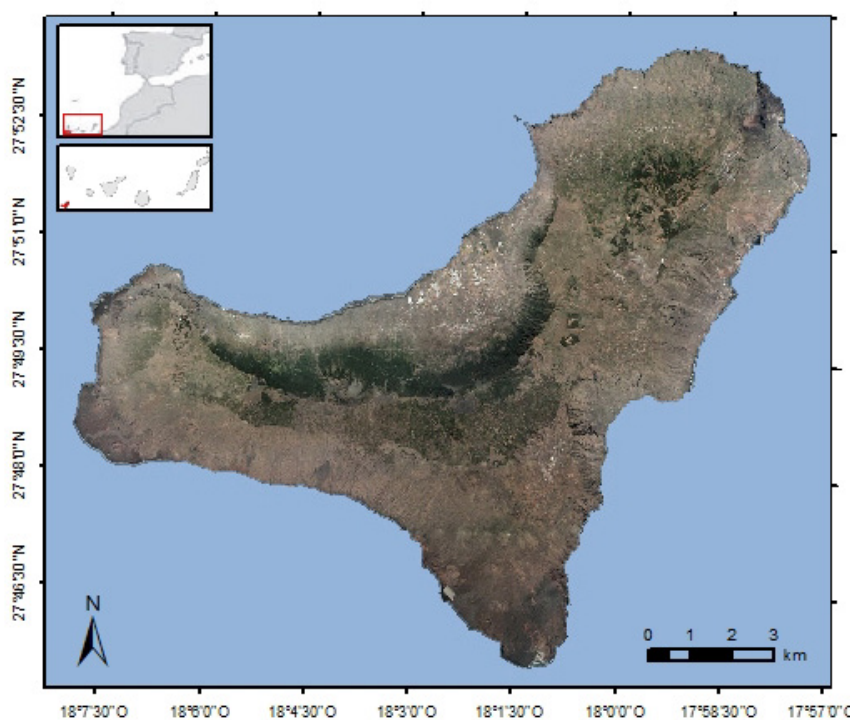


Figura 2.1. Mapa de situación de la isla de El Hierro a partir de la ortofotografía.

El Hierro pertenece a la provincia de Santa Cruz de Tenerife y tiene tres municipios, Valverde, Frontera y El Pinar. Las principales poblaciones en el norte son Guarazoca y Mocanal, y la capital, Valverde, en el noreste. En el interior destacan Isora y San Andrés. La población más al sur es La Restinga. Entre Isora y La Restinga destaca El Pinar (Las Casas y Taibique). Finalmente, en El Golfo, encontramos asentamientos de Frontera, y en el extremo este Las Puntas. En 1857 la población era de 4.642 habitantes, en 1900 de 6.508, en 1940 de 8.849, en 1970 de 5.503 y de 10.679 en 2017.

Presenta un patrimonio natural propio, además de una riqueza cultural. Por todo ello, se le declaró en el año 2000 Reserva de la Biosfera por la UNESCO.

2.2. CLIMA.

Debido a la orografía de la isla, la climatología está condicionada por la altitud y la orientación. Los vientos alisios tienen una influencia desde la vertiente septentrional hasta la meridional. Estos vientos se originan por el anticiclón de las Azores y la corriente fría de Canarias. Los alisios están formados por una capa inferior, húmeda y fría, y una capa superior, seca y cálida ya que no está influenciada por el océano. Entre estas dos capas se produce una inversión térmica (Martín, 2009) (figura 2.2).

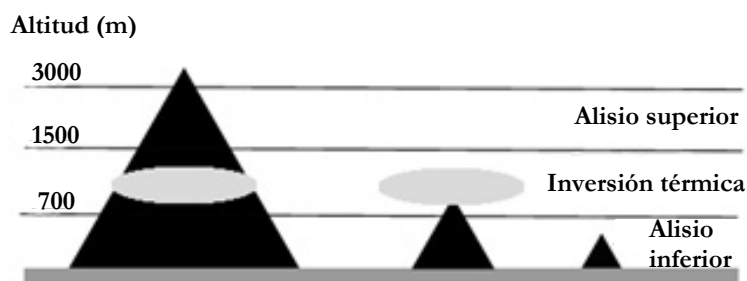


Figura 2.2. Esquema en sección de los alisios superior e inferior. Fuente: Adaptado de Morales y Santana, 2005.

En la costa noreste, la dirección predominante es del norte-noroeste. Debido a la topografía se producen cambios en la dirección, como se muestra en la figura 2.3, en el altiplano central del noreste cambia la dirección hacia el sur, en el este de El Golfo varía al norte-noroeste, y en el oeste hacia el sur. En el sudeste el viento es menos frecuente y con menor velocidad (Stierstorfer, 2005).

Los vientos favorecen la humedad en toda la vertiente norte, sobre todo en El Golfo y la parte más nororiental. La corriente marina de aguas frías enfría desde la base el aire cálido, haciendo que los alisios transporten humedad en sus capas inferiores mientras que las

superiores son secas (Godoy, 1982).

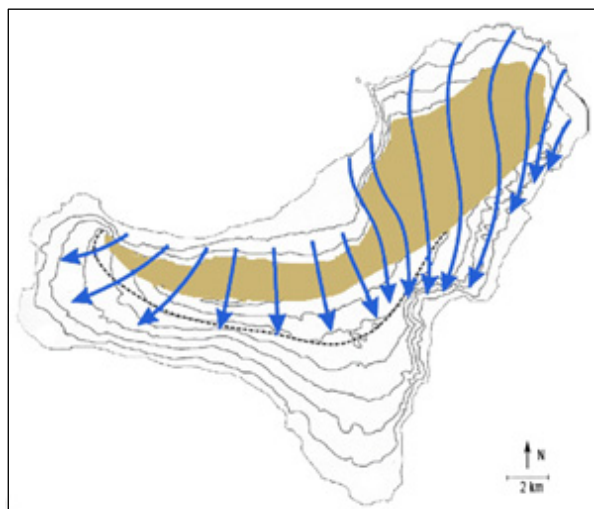


Figura 2.3. Dirección de los vientos alisios. El área sombreada corresponde a la zona de presencia de las nubes. La línea discontinua es la zona si las nubes superan las cumbres. Fuente: Stierstorfer, 2005.

Esta circulación del viento es el principal factor determinante del clima en la isla. Dicha influencia es máxima en junio, con una velocidad media de los alisios entre 20 a 30 km/h, y mínima en enero con una velocidad media de 10 a 20 km/h. En invierno hay una influencia de viento monzónico, sobre todo en las zonas más elevadas. Esto es debido a que el anticiclón que se produce en el norte de África tiene la suficiente entidad para que la corriente proveniente del Sáhara llegue hasta El Hierro (Font, 1959), transportando polvo y provocando que los fuertes vientos afecten a los cultivos.

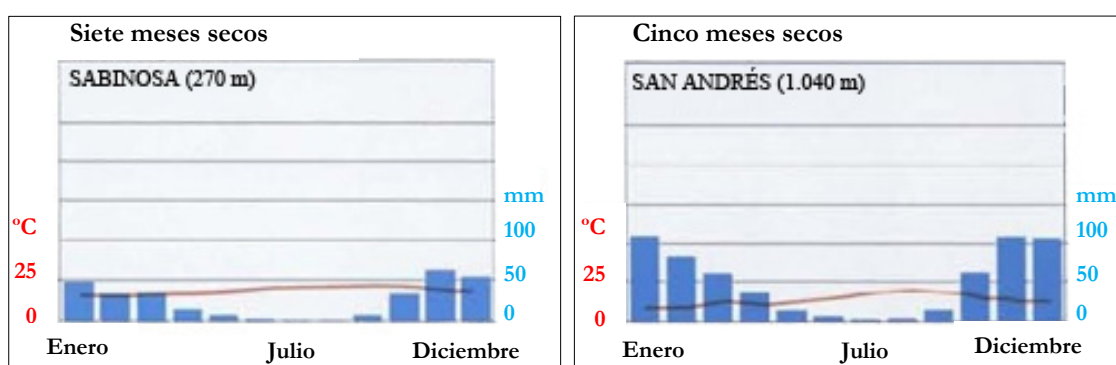


Figura 2.4. Climogramas de las estaciones de Sabinosa y San Andrés. Fuente: AEMET, en Marzol, 2000.

La estación de San Andrés, situada a 1.040 m, muestra una variación térmica más acusada que las estaciones de Sabinosa y El Hierro-Aeropuerto (figuras 2.4 y 2.5). Esta diferencia

también está presente en los datos de pluviometría, habiendo cinco meses secos en esta zona frente a los siete de Sabinosa y el Aeropuerto.

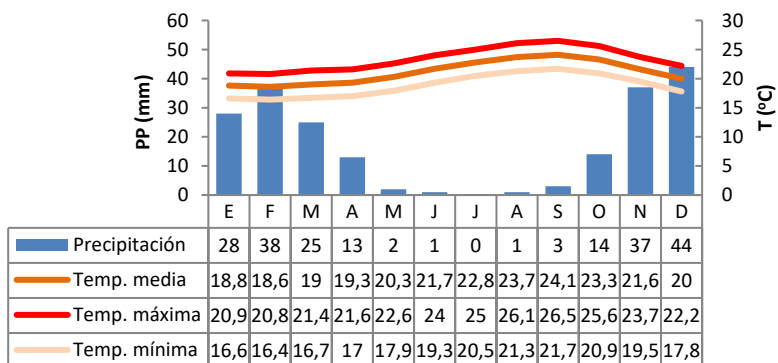


Figura 2.5. Climograma en la estación de El Hierro-Aeropuerto (32 m), para el periodo 1981-2010. Fuente: Elaboración propia con datos de AEMET.

El análisis de los valores de temperatura de la tabla 2.1 indica que los meses más calurosos corresponden a agosto y septiembre, mientras que los más fríos a febrero y enero. La estación de referencia es la del Aeropuerto ya que tiene la serie más larga. Se han ordenado las estaciones por altitud, mostrando más temperatura a menor altitud. Las temperaturas medias disponibles oscilan entre los 13,8°C (San Andrés) en las zonas más elevadas a los 20,9°C a nivel de la costa (Sabinosa, Tacorón). Los datos que se presentan en la tabla 2.1 coinciden a grandes rasgos con los proporcionados por Fernández-Pello (1989) y por Marzol (2000). En la figura 2.6 se observa una variación térmica en función de la altitud y un mayor gradiente térmico en El Golfo y Las Playas debido a la orografía de la isla. En La Dehesa y en La Restinga es donde se observa una mayor extensión de las temperaturas más cálidas.

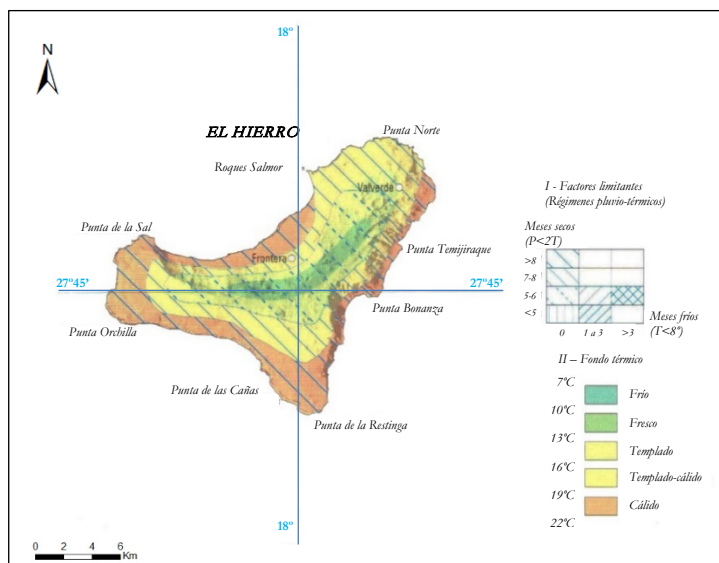


Figura 2.6. Mapa climático de El Hierro. Fuente: Marzol, 2000.

Tabla 2.1. Precipitaciones medias mensuales y anuales. Temperaturas medias mensuales y anuales.
Fuente: AEMET y proyecto JUNITUR.

EL HIERRO/Precipitación media mensual y anual. Datos procedentes de AEMET.		Medias mensuales y anuales.														
Estación (código AEMET)	Alt. m snm	Serie	Sp.	Oc.	Nv.	Dc.	En.	Fb.	Mr.	Ab.	My.	Jn.	Jl.	Ag.	PPT anual	
			% dds disp.													
Estación de referencia																
EL HIERRO-Aeropuerto (C929I)	32	1974-2014	100,0	2,8	12,9	31,8	38,5	30,2	31,1	21,5	13,1	1,8	0,8	0,1	0,6	185,2
Estaciones automáticas de AEMET																
SABINOSA-Balneario (C939I)	20	2009-2014	77,9	11,5	10,5	48,9	77,6	41,1	18,7	12,4	19,6	2,6	0,5	0,4	0,4	244,2
TACORÓN-Lapillas (C919K)	98	2010-2014	92,4	6,4	28,3	68,2	26,5	18,9	27,7	9,9	12,3	0,2	0,0	0,0	0,0	198,2
DEHESA-Refugio (C017E)	715	2009-2014	94,8	9,1	17,2	66,1	81,2	37,9	71,2	23,3	26,8	8,6	1,0	1,4	1,0	344,7
PINAR-Depósito (C916Q)	948	2009-2014	93,8	12,6	49,7	129,8	160,0	101,1	103,7	42,1	34,4	3,1	0,2	0,1	0,1	636,8
SAN ANDRÉS-Depósito (C925F)	1.070	2009-2014	93,0	1,0	55,8	114,7	100,4	76,2	103,8	55,2	41,5	8,5	2,6	4,8	2,1	566,5
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <i>Mes con media pluviométrica máxima principal.</i> <i>Mes con media pluviométrica máxima secundaria.</i> </div>																
EL HIERRO/Temperatura media mensual y anual (°C). Datos procedentes de AEMET y del Proyecto JUNITUR.																
Estación (código AEMET)	Alt. m snm	Serie	Sp.	Oc.	Nv.	Dc.	En.	Fb.	Mr.	Ab.	My.	Jn.	Jl.	Ag.	T anual	
			% dds disp.													
Estación de referencia																
EL HIERRO-Aeropuerto (C929I)	32	1974-2014	100,0	23,8	22,9	21,3	19,6	18,5	18,3	18,6	19,0	19,9	21,3	22,4	23,4	20,8
Estaciones automáticas de AEMET																
SABINOSA-Balneario (C939I)	20	2009-2014	77,9	23,9	23,2	21,0	19,7	18,3	17,9	18,4	19,3	20,6	22,0	23,1	24,1	20,9
TACORÓN-Lapillas (C919K)	98	2010-2014	92,4	23,7	23,6	21,2	20,2	19,0	18,0	18,2	19,1	20,3	21,6	22,7	22,6	20,9
DEHESA-Refugio (C017E)	715	2009-2014	94,8	20,2	19,0	16,0	14,7	13,4	12,8	13,7	14,4	16,4	18,9	21,4	23,1	17,0
PINAR-Depósito (C916Q)	948	2009-2014	93,8	18,8	17,1	13,9	12,4	11,3	11,0	12,3	12,8	15,0	18,2	21,5	22,9	15,6
SAN ANDRÉS-Depósito (C925F)	1.070	2009-2014	93,0	17,5	16,1	12,7	11,0	9,9	9,7	10,8	11,4	13,2	15,7	17,4	20,4	13,8
Estaciones del Proyecto JUNITUR																
SABINOSA	258	2012-2015	100,0	22,7	21,7	19,0	17,5	16,2	15,7	16,3	17,7	18,8	20,0	21,8	22,5	19,2
EL SABINAR DE LA DEHESA	528	2012-2015	100,0	20,7	19,9	17,0	15,6	14,1	13,6	14,4	15,8	17,0	17,4	20,2	21,1	17,2
EL JULAN	996	2012-2015	100,0	19,4	17,8	14,3	13,3	12,1	11,7	13,2	14,5	17,5	18,0	22,9	23,7	16,5
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <i>Mes con media termométrica máxima principal.</i> <i>Mes con media termométrica máxima secundaria.</i> </div>																

Las temperaturas extremas van desde los 0°C en las zonas más altas a los 45°C en el sudoeste, aunque no es habitual (Del Arco *et al.*, 1996). Los episodios de máximo calor se dan con vientos que provienen de África en verano en forma de olas de calor, estos pueden hacer que en zonas con mayor altitud haya mayor temperatura respecto a cotas inferiores (Huetz, 1969).

En cuanto a las precipitaciones mensuales para el periodo 2009-2014, la tabla 2.1 muestra la fuerte irregularidad pluviométrica media mensual en un mismo lugar, siendo los meses más secos los que van de mayo a septiembre, mientras que los meses más húmedos son noviembre, diciembre y febrero, final de otoño a principio de invierno. El mayor volumen se registra en la estación del Pinar con 636,8 mm de media anual. En las cotas más altas la precipitación aumenta y se observan valores muy bajos a nivel de mar. Para una misma cota la cara sur es más seca, como se observa en Tacorón, constatándose el déficit pluviométrico (sombra pluviométrica) en dicha vertiente sur. Los valores medios aumentan con la altitud (figura 2.8), con un incremento de 40 mm por cada 100 m (figura 2.7).

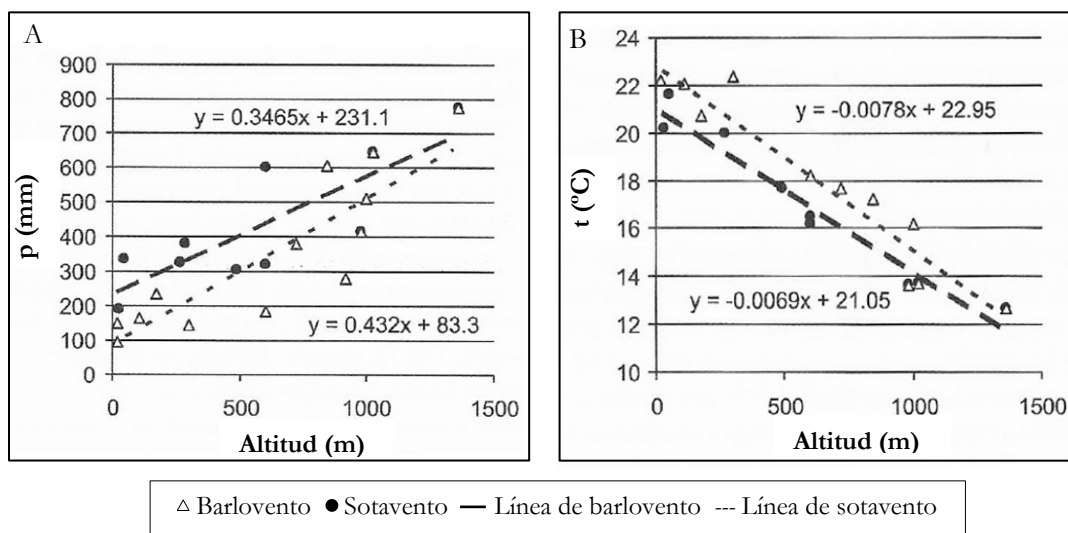


Figura 2.7. (A) Incremento de la precipitación media anual con la altura. (B) Descenso de la temperatura media anual con la altura. Fuente: Stierstorfer, 2005.

Cuando los vientos alisios entran en contacto con la isla, se produce un ascenso del aire húmedo hasta la línea de inversión térmica, enfriándose y formando las nubes en un plano horizontal. En cotas por encima de los 500 m en el norte y noreste, donde hay influencia de los vientos húmedos, se produce la lluvia horizontal¹, llegando a suministrar 300 mm, aunque su cantidad afecta a áreas muy concretas debido a la topografía, en cambio, en el sotavento encontramos un régimen pluviométrico notablemente más seco (Dorta, 1996; Marzol, 2000). Este tipo de lluvia horizontal tiene su mínimo en verano. Es en junio cuando el número de días con nubes es mayor, aunque su espesor es menor, y es por ello

¹ Partículas de agua en suspensión de las nubes que entran en contacto con superficies frías como las hojas.

que en la parte más septentrional donde la pendiente es más pronunciada, las nubes no llegan a las cumbres. La presencia de aire polar del océano en invierno aumenta la humedad, haciendo que se produzcan precipitaciones intensas. Esto es posible al ascender aire húmedo y frío por la desaparición de la inversión térmica.

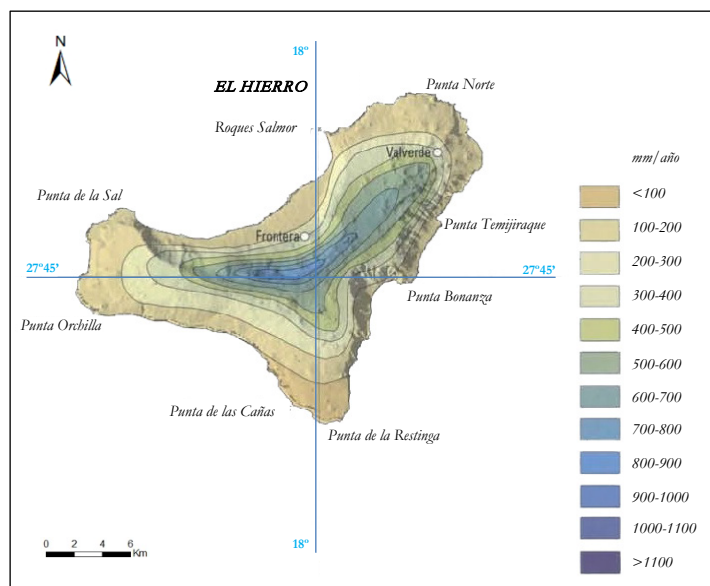


Figura 2.8. Mapa pluviométrico de El Hierro. Fuente: Marzol, 2000.

La intensidad pluviométrica es muy irregular siendo más acusada en las zonas con menor altitud (Marzol, 1988). Si además aparece una corriente muy fría en las capas superiores, se produce un fuerte contraste térmico con la superficie terrestre formándose nubes de desarrollo vertical.

Las características del clima hacen que éste sea un factor fundamental en la distribución del sabinar. Para ello, las medidas de campo de temperaturas del aire y del suelo son un importante indicador. En este aspecto, dentro de los proyectos JUNITUR y JUNITUR+ se han monitorizado estos valores, con siete estaciones en los sabinares (tabla 2.1 y figura 2.9).

En la tabla 2.1 se muestran los resultados para el periodo 2012-2015 de las estaciones situadas en El Julan a 996 m, en El Sabinar de La Dehesa a 528 m y en Sabinosa a 256 m. Se ha observado un fuerte contraste de la temperatura del suelo y del aire. Se constata una menor temperatura media anual en el sabinar de la cara sur (16,5°C), con un mayor gradiente térmico, respecto a la cara norte (19,2°C). En los sabinares, las temperaturas máximas se producen en agosto y septiembre, y las mínimas en febrero y enero. Según los resultados obtenidos en el proyecto JUNITUR la amplitud térmica es reducida (Salvà-Catarineu *et al.*, 2014b, 2015, 2016a, 2016b).

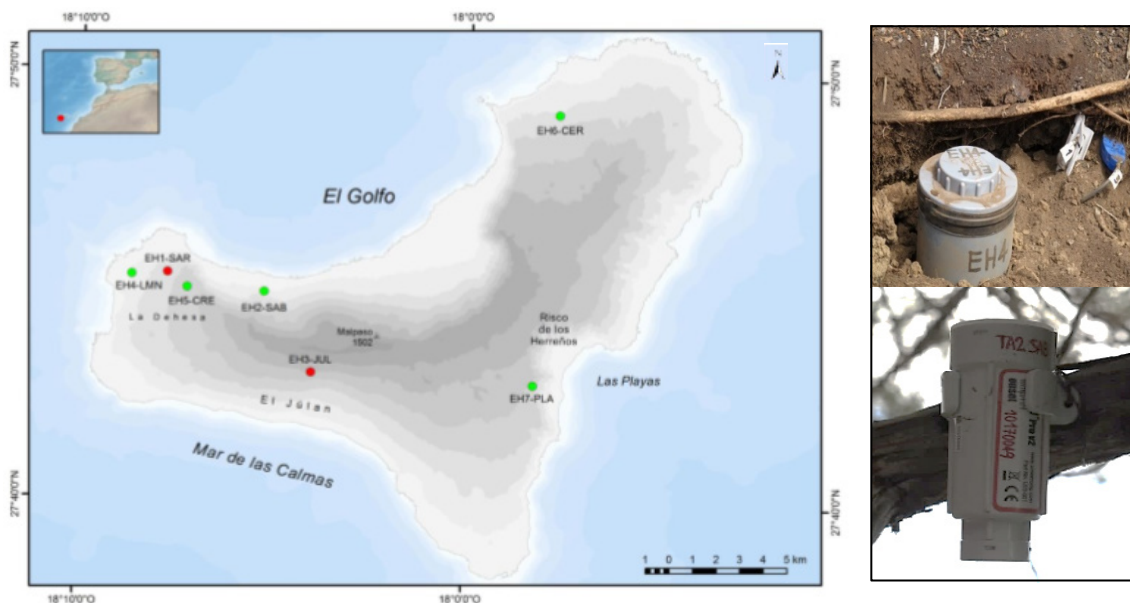


Figura 2.9. Distribución de las estaciones de los proyectos JUNITUR y JUNITUR+ (izquierda). Fuente: Salvà-Catarineu *et al.*, 2012. Sensor de temperatura (TMC6-HD) y humedad del suelo (ECH2O EA10) y termohigrómetro del aire (U23-001 HOBO®Pro v2 Temp/RH).

En resumen, podemos concluir que la nubosidad en cotas medias y altas es debida a la combinación de los vientos alisios del noreste y la topografía de la isla, ya que, al chocar la humedad asciende y se enfría generando nubes y niebla. Se generan dos zonas, debido a que el efecto de inversión desaparece hacia los 1.200 m: una zona húmeda y fría, y otra seca y cálida en la parte sur de la isla, a sotavento. Podemos hablar de unas condiciones de temperatura y humedad diferenciadas que determinan el tipo de vegetación.

2.3. GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA.

El Hierro se encuentra sobre la pendiente continental del noroeste africano (Carracedo *et al.*, 2001). La base del escudo volcánico de la isla se encuentra a unos 3.700-4.000 m de profundidad, y tiene unos 150 Ma de antigüedad. Su vulcanismo es moderno, es la más joven del Archipiélago, formándose hace 1,12 Ma, y está condicionado por tres ejes estructurales (NE-SO, NO-SE y N-S) (Mitchell-Thomé, 1976; Carracedo y Troll, 2013; Carracedo *et al.*, 2015). Está justo encima de la anomalía térmica que determina el crecimiento del archipiélago (Geldmacher *et al.*, 2005). Su formación ha tenido lugar en varios ciclos volcánicos por la yuxtaposición de sucesivos volcanes. El crecimiento de dos volcanes (El Tiñor y El Golfo) y los *rifts*, ha determinado la actividad volcánica.

En su desarrollo podemos distinguir tres fases. El Tiñor tuvo un crecimiento rápido hace 1,12 Ma hasta los 0,88 Ma. Después del crecimiento del volcán, se pasó a una fase de

erupciones de lava menos intensas y finalmente una fase explosiva, reconocida en los xenolitos de lava que fluyeron hacia Valverde y la costa este, y en la forma de los conos, formando el grupo de Ventejís, con una altura de 1.137 m. A raíz de este hecho se produjo el colapso de la parte noroeste del Tiñor, arrastrando al océano más de la mitad del volcán, formándose una gran depresión calderiforme.

Después del deslizamiento del Tiñor y tras un periodo de reposo (350.000 años), se formó El Golfo entre los 545.000 y los 176.000 años (Carracedo *et al*, 1997). Esta formación originó un crecimiento de la isla hacia el oeste y el sudoeste. Se distinguen dos subunidades (Pellicer, 1977). Primero, las erupciones constantes en su origen formaron apilamientos basálticos en las direcciones que forman las actuales líneas estructurales, hasta los 1.501 m. Entre estos apilamientos basálticos encontramos piroclastos y escorias, en capas discontinuas estratigráficas, representando la existencia de conos volcánicos. Esta actividad volcánica se produjo casi de manera continua, ya que en los breves periodos de descanso se originaron paleosuelos de color pardo rojizo formados por arcillas y rocas. A continuación, se produjeron erupciones de lava de menor potencia, de magma basáltico alcalino, con lo que la cantidad de rocas tipo traquita es muy escasa (Fuster, 1975), con conos piroclásticos intercalados. Debido a todo este proceso se encuentran muchos diques verticales en su mayoría basálticos en la dirección NE-SE. Las emisiones finales de El Golfo (traquitas y benmoreitas) están formadas por coladas más potentes y en la parte alta con colores claros (Carracedo, 2008).

Finalmente, después de un intervalo de poca actividad, desde los 176.000 hasta los 158.000 años, donde explosiones de magma gasificado generaron por toda la isla calderas verticales, se produjeron una serie de explosiones en la zona noroeste de El Golfo (Hernández, 1982), con formaciones alcalinas. Se producen tres colapsos laterales, El Julan en el sudoeste, el de El Golfo en el norte y el de Las Playas en el sureste, todo ello debido a la actividad de los *rifts*. Estas erupciones quedan enmarcadas en las líneas estructurales de la isla, llegando este material lávico al océano, formando las costas y aumentando la superficie de El Hierro. Hace más de 160.000 años se produjo un deslizamiento de El Julan en el sudoeste, aunque no está presente en superficie. Aproximadamente, 130 km³ de material se vertió al océano, siendo en la actualidad una reserva marina (Mar de las Calmas). El deslizamiento de San Andrés está incompleto y se produjo muy rápido. Se puede constatar como falla que va desde La Caleta hasta Las Playas. El colapso de Las Playas se estima hace 145.000 años, siendo actualmente una hondonada fuertemente erosionada. Finalmente, el deslizamiento de El Golfo hace 13.000 años (Longpré *et al*, 2011), se vertió al océano 1.170 km³ de rocas. El resultado fue una depresión calderiforme de costa, con un escarpe de 1.100 m de altura.

En el caso de Frontera, su desarrollo empezó hace 37.000 años y aún continúa. Numerosos conos volcánicos de esta fase se pueden observar actualmente. Parece ser que la erupción más reciente fue la del volcán Lomo Negro en 1793 (Hernández, 1982; Carracedo *et al*, 2015), pero de la que se tiene constancia es la de montaña Chamuscada, próxima a San

Andrés, hace 2.500 años (Guillou *et al.*, 1996). En 2011 se produjo una erupción submarina frente a La Restinga, con una actividad sísmica de 83 días antes de la erupción.

Esta forma anidada de crecimiento de volcanes a partir de los deslizamientos sucesivos, que continúa actualmente con la formación de un nuevo volcán a partir de El Golfo, forma la estructura interna de la isla. En los últimos miles de años no ha habido una gran actividad volcánica. Los elementos estructurales que han intervenido en la isla han sido los *rifts* y los deslizamientos. Los primeros se han producido por una rotura triple de la corteza debido al empuje del magma, haciendo que se concentrara en su centro la actividad volcánica. Las áreas extensas con baja densidad son las que producen rotura en tres ejes. Es probable que a una profundidad de 6 a 10 km del centro de la isla se localice un cuerpo de alta densidad (Montesinos *et al.*, 2006). Los segundos por el colapso de los volcanes. Se observan diversas estructuras volcánicas: conos, lavas, coladas, tubos, canales y diques. A partir del estudio de la erupción submarina del 2011, se constata que la isla puede seguir recibiendo material submarino y por lo tanto creciendo (Carracedo *et al.*, 2015).

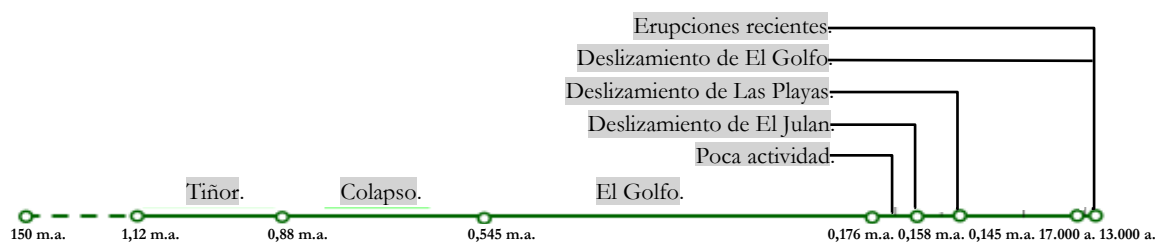


Figura 2.10. Cronología de la formación de la isla de El Hierro.

Según Gee *et al.* (2001), la morfología de la isla ha estado condicionada por los deslizamientos gravitacionales masivos, el primero el de San Andrés hace 545.000-175.000 años, el segundo el de Las Playas hace 176.000-145.000 años, el tercero el de El Julan hace más de 200.000 años y el cuarto el de El Golfo hace 17.000-10.000 años (figura 2.11).

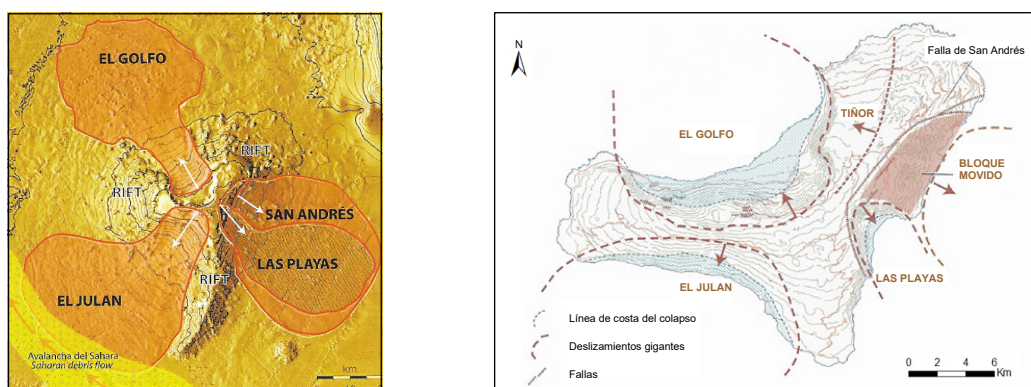


Figura 2.11. Deslizamientos laterales en la isla de El Hierro. Fuente: Masson *et al.* (2002) (izquierda) y Carracedo (2008) (derecha).

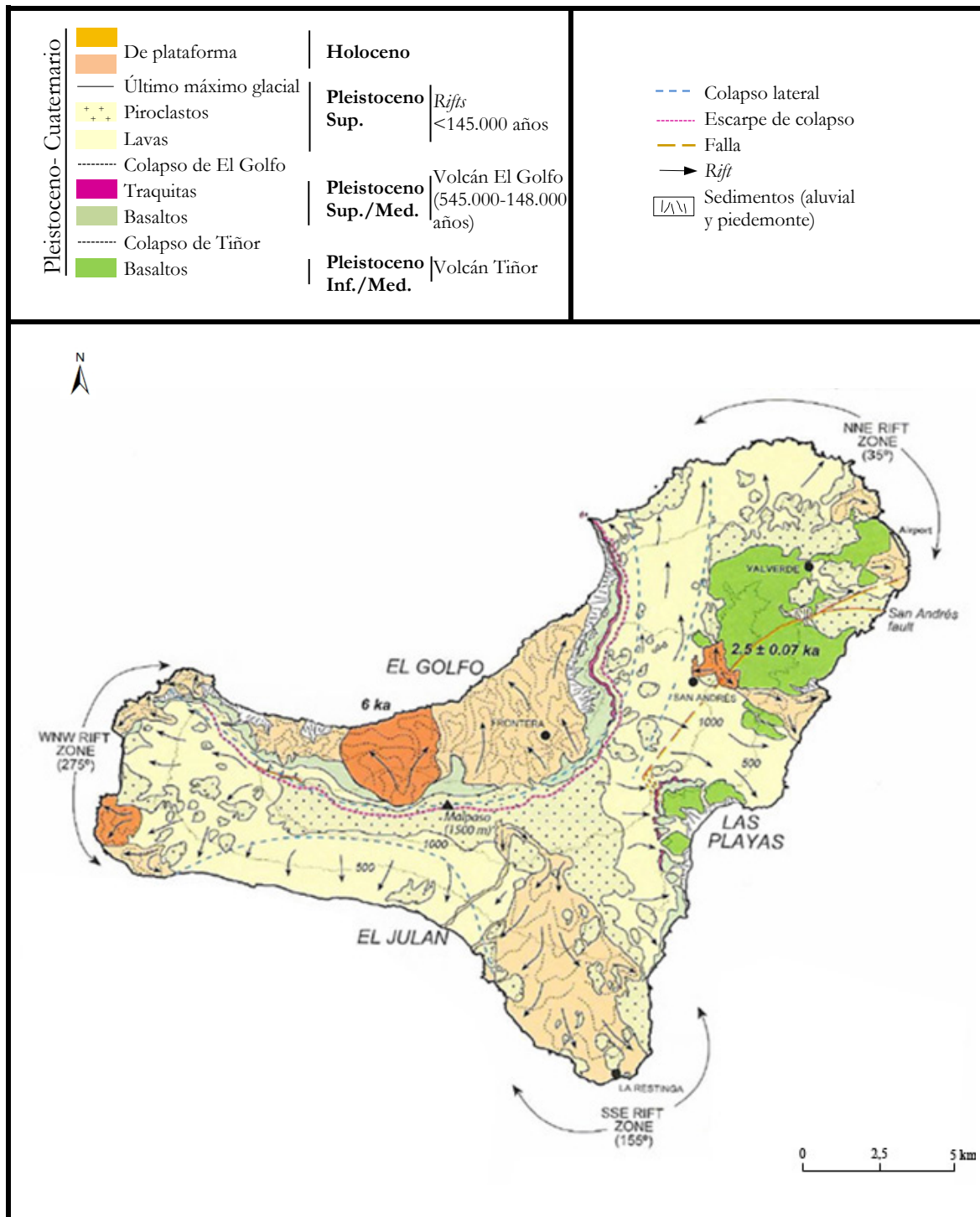


Figura 2.12. Mapa geológico de El Hierro. Fuente: Carracedo *et al.* (2001).

2.4. HIDROLOGÍA.

Debido a las características geológicas y climáticas de El Hierro, no hay cursos de agua superficiales. Actualmente en la isla no existen ni lagos, ni lagunas, ni cauces naturales. La acción antrópica ha tenido una gran influencia sobre los recursos acuíferos de la isla (Martín, 2009).

Los materiales que forman la superficie de la isla son muy porosos, debido a las características de formación. Estos materiales poseen mucha permeabilidad ya que no han sufrido grandes cambios porque como la formación de la isla es reciente no se han producido largos intervalos de tiempo sin inactividad volcánica. Debido a ello, filtran toda el agua de lluvia sin que se produzca retención superficial, formándose acuíferos rápidamente (Navarro y Soler, 1995). Los constantes procesos erosivos (hídricos y por el viento), sumado a las fuertes pendientes y escasa cobertura vegetal en algunos sectores muy jóvenes de la isla, contribuye a la ausencia de agua superficial (Santamarta *et al.*, 2013). La escorrentía en El Hierro es de 0,3 Hm³/año (PHEH, 2017).

La gestión del agua, junto con el energético y el de residuos, es uno de los elementos primordiales del desarrollo de la isla. Para ello se han delimitado tres masas de agua subterránea: acuífero Valle de El Golfo (75,12 km²), el acuífero Valverde-Zona oriental (88,89 km²) y el acuífero El Julan-Zona sur (105,02 km²). En el primero, el agua que se infiltra por la parte oriental del escarpe de El Golfo procedentes de Nisdafe es de buena calidad, sin embargo, en la parte más occidental el agua se mezcla con dióxido de carbono de lavas jóvenes, conteniendo bicarbonatos. En el acuífero de Valverde-Zona oriental se producen las mayores infiltraciones en la parte oeste, mientras que en el noroeste el dióxido de carbono de las lavas jóvenes se mezcla con el agua. En el acuífero El Julan-Zona sur es donde hay una mayor presencia de agua del océano y de bicarbonatos (PHEH, 2017). Como se observa en la tabla 2.2, las extracciones de agua subterránea son inferiores al consumo (23,3%).

Tabla 2.2. Recursos y consumos hidrológicos (m³/año). Fuente: PHEH, 2015.

	Recursos	Consumos
Subterráneos	2.363.400	1.813.320
Desalación	2.047.500	1.374.907
Total	4.410.900	3.188.227

El 56,9% del consumo proviene de aguas subterráneas. Destacar que los recursos subterráneos se utilizan en su mayoría para el uso agrícola, mientras que la desalación de agua marina tiene un destino urbano. Actualmente, en la isla hay tres desaladoras (La Restinga, El Cangrejo y El Golfo) y catorce depuradoras (Tamaduste, Caleta, Valverde,

Mocanal, Las Puntas, El Majano, Frontera, Timuraque, San Andrés, Pozo La Salud, Sabinosa, Las Playas, El Pinar y La Restinga) (PHEH, 2015).

2.5. VEGETACIÓN.

La isla de El Hierro posee una gran fitodiversidad debido a la altitud, que condiciona la temperatura y la humedad. En la isla, reserva de la biosfera, las áreas protegidas representan el 60 % de la superficie. La existencia de esta variedad de flora y de vegetación se debe a los diferentes pisos bioclimáticos presentes en la isla. En El Hierro se distinguen tres termotipos mediterráneos de los cinco reconocidos en Canarias² (Del Arco *et al.*, 2006):

- Inframediterráneo con matorrales subarbuscivos abiertos. En la zona E-NE y en el sudoeste se extiende el tabaibal dulce (*Euphorbia balsamifera*). A una menor cota, hasta los 400 m, de manera irregular rodeando la isla se encuentra el cardonal (*Euphorbia canariensis*), en los acantilados y laderas de barrancos en el noreste y en Las Playas.
- Termomediterráneo con bosques termoesclerófilos. A una altitud en la que no se encuentran nieblas está el sabinar (*Juniperus turbinata*), entre los 100 y 600 m siendo en algunas zonas un sabinar mixto bien sea con pinos o monteverde.
- Mesomediterráneo con bosques de laurisilva y pinares de pino canario (*Pinus canariensis*). Como se menciona en el apartado del clima, es en el norte y noreste donde la influencia de la humedad es más importante. En la vertiente de barlovento, donde las nieblas de los alisios son presentes, crece el monteverde (higrófilo, húmedo, fayal-brezal, fayal de altitud y seco) y en las cotas más elevadas de la vertiente meridional, entre los 900 y 1.200 m, se encuentra el pinar de pino canario.

En la costa también se encuentran especies halófilas, como el tomillo marino, la servilleta y la siempreviva. En los escarpes rocosos están las comunidades rupícolas y fisurícolas, además de líquenes y helechos. El *Schizogyne sericea* está presente en las arenas volcánicas a poca altitud. En las partes altas, donde ha habido más talas de pinos, hay comunidades de tomillos (*Micromeria hysopifolia*) y ajinajos (*Echium aculeatum*). A partir de los 500 m, en zonas de poca humedad y viento, degradadas de laurisilva, se encuentra el fayal-brezal.

También hay la variación climática horizontal que se muestra en la vegetación, debido a la topografía. En las vertientes donde hay aportación de humedad por los alisios (barlovento), se desarrolla una vegetación como el monteverde, que no ocurre a sotavento a la misma

² Inframediterráneo, termomediterráneo, mesomediterráneo, supramediterráneo y oromediterráneo.

cota. En cambio, vegetación propia de suelos más áridos, invaden altitudes superiores a sotavento (González *et al.*, 2017).

2.5.1. EL SABINAR.

Se localiza en las laderas medias, entre el cardonal y el tabaibal en la parte inferior y el monteverde en la superior, de forma discontinua. Esta discontinuidad espacial es debida a factores antrópicos, mientras que la diversidad que presenta es por las condiciones climáticas de la isla (González *et al.*, 2017). El sotobosque del sabinar está formado por matorral, pero no por especies arbustivas, debido a los valores de precipitación y de temperatura. El factor antrópico ha sido el más determinante para explicar la actual ocupación espacial, confinada a menos de un 8 % de su área potencial (Kämmer, 1976a; Del Arco, 2010). A pesar de ello, en El Hierro aún se encuentran los mayores sabinares del archipiélago canario (Kämmer, 1976b), siendo abundantes en vegetación endémica y en peligro de extinción en algunas islas (Otto *et al.*, 2010). Se tiene constancia de 170 taxones encontrados en los sabinares, el 30,8% de todos los taxones de la isla (Romo y Salvà-Catarineu, 2013; Romo *et al.*, 2014), de ellos 32 especies son endémicas: 20 especies son endémicas canarias, 8 endemismos macaronésicos y 4 especies endémicas herreñas (*Argyranthemum hierrense*, *Echium hierrense*, *Pericallis murrayi*, *Scrophularia smithii* subsp. *hierrensis*) (Romo y Salvà-Catarineu, 2013; Romo *et al.*, 2014).

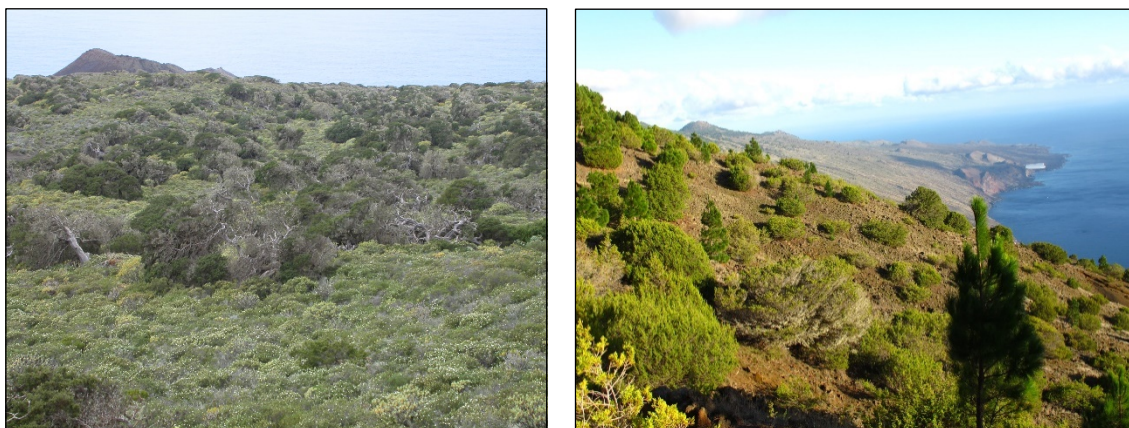


Figura 2.13. Sabinar de La Dehesa (izquierda) y sabinar de El Julan (derecha).

El endemismo mediterráneo-macaronésico *Juniperus turbinata* subsp. *canariensis* se localiza en cinco islas de Canarias: Tenerife, Gran Canaria, La Palma, La Gomera y El Hierro (Hansen y Sundig, 1993). En cuanto a su extensión, su calidad del hábitat y su dinámica está catalogado como desconocida (Montesinos *et al.*, 2009). En El Hierro se encuentran las mayores extensiones y los ejemplares más longevos. Se ha descrito una asociación endémica de El Hierro *Rubio fruticosae-Juniperetum canariensis* que corresponde a un bosque semiabierto de sabinas (Del Arco *et al.*, 2006). La mayor extensión de sabinares

corresponde a esta asociación de sabinar seco (*Rubio fruticosae-Juniperetum canariensis*) que se localiza en La Dehesa, en El Julan (figura 2.13) y en un pequeño sector de Las Playas, pero también existen dos subasociaciones como el sabinar húmedo (*Rubio fruticosae-Juniperetum canariensis* subas. *ericetosum arboreae*) que se encuentra en El Golfo cerca de Sabinosa y el sabinar con pinos (*Rubio fruticosae-Juniperetum canariensis* subas. *pinetosum canariensis*) en El Julan y en Las Playas. En La Dehesa se conserva el sabinar herreño con los ejemplares más viejos de la isla que con la fuerza de los vientos alisios hace que adquieran un crecimiento arqueado característico.

En las cotas inferiores de El Jaral su distribución es más fragmentada. La topografía de El Julan, con importantes pendientes, la sequedad del terreno y las talas pretéritas de sabinares, han determinado la distribución actual que en cotas altas se mezclan con los pinos canarios. El sabinar herreño húmedo se encuentra desde Los Llanillos hasta Sabinosa, con presencia en los sitios más abruptos y de forma intermitente. Por su situación a barlovento hay más humedad, lo que favorece su crecimiento. En cotas más altas coexiste con el fayal-brezal, mientras que en las inferiores se ha visto afectado por las actividades agrícolas (Fernández-Pello, 1989).

Estudios recientes (Salvà-Catarineu *et al.*, 2014b) han demostrado que la distribución del *Juniperus turbinata* en El Hierro, aunque puede crecer en suelos poco desarrollados, está relacionada con la temperatura y la humedad, haciendo que se haya poca regeneración en ambientes límites y una lenta recuperación donde se dan las condiciones óptimas de humedad. Por lo tanto, depende de la altitud y la exposición a los alisios (Johnson y Miller, 2006). Según Otto *et al.* (2010), para su regeneración influyen las condiciones a nivel de microhábitats y la disipación de semillas, factores que se dan cuando hay proximidad entre los ejemplares adultos. García-Romero *et al.* (2018) añade el factor del estrés abiótico y Olano *et al.* (2008) el factor antrópico. También cabe destacar que algunos rebaños puedan eliminar los brotes de sabinas (Salvà-Catarineu y Romo, 2008; Romo *et al.*, 2014). Durante largos periodos de tiempo han estado sometidos a una fuerte presión ganadera (Fernández-Pello *et al.*, 2006), ya que no se encuentran áreas con todos los estadios de árboles, y es por lo que las mayores densidades están en zonas con más pendiente. En los lugares donde esta actividad ha cesado, se ha producido una regeneración, encontrándose plántulas jóvenes, como en El Julan y en Sabinosa.

En consecuencia, el cambio de usos de los sabinares de El Hierro ha hecho que la presencia del *Juniperus turbinata* se recupere, aunque es muy reducida en comparación con su potencial área de desarrollo.

Juniperus turbinata Guss. (figura 2.14 A).

Juniperus: enebro. *turbinata*: forma cónica. Guss: G. Gussone.

Taxón de las Islas Canarias característico del bosque termófilo. Es una especie perenne propia del sabinar. Formada por ramas cilíndricas en forma de escamas de unos 3 mm. Presenta individuos con abundancia de flores masculinas, otros con flores femeninas y otros con igual número. La floración se produce entre febrero y abril. Los frutos son esféricos de 1 cm de diámetro, con una propagación debida a aves grandes (cuervos y mirlos) y lagartos. Está adaptada a ambientes áridos y semiáridos, siendo su crecimiento lento. Está presente en Canarias excepto en Fuerteventura y Lanzarote, con una mayor extensión en El Hierro.

Pinus canariensis (figura 2.14 B).

Pinus: pino. *canariensis*: origen canario.

Especie endémica canaria que forma bosques denominados pinares. Se distribuye en todas las islas excepto Fuerteventura y Lanzarote. Árbol de una altura media de 20 m, con hojas en forma de aguja de 25 cm y troncos de 60 cm de diámetro medio. Presenta flores masculinas (verdosas) agrupadas en racimos y femeninas (moradas). En el interior de las piñas se encuentran las semillas (piñones). Su crecimiento no está afectado por el tipo de suelo, presentando una gran resistencia a las temperaturas.

Laurisilva (figura 2.14 D).

Lauri: laurel. Silva: bosque.

Bosque formado por diversas especies arbóreas: laurel (*Laurus azorica*), til (*Ocotea foetens*), viñátigo (*Persea indica*), barbusano (*Apollonias barbujuana*), palo blanco (*Picconia excelsa*), acebiño (*Ilex canariensis*), mocán (*Visnea mocanera*), etc. Se desarrolla en las zonas más húmedas y debido a lo tupido de la cubierta el sotobosque lo forman líquenes, helechos, musgos, hongos, etc. Junto con el fayal-brezal y el fayal de altitud forma el Monteverde. Se encuentra en todas las islas excepto en Fuerteventura y Lanzarote.

Myrica fayae-Ericetum arboreae (figura 2.14 E).

Myrica: taray, tamarisco. *Fayae*: faya. *Ericetum*: brezo. *Arboreae*: árbol.

El fayal-brezal es un bosque formado por diversas especies arbóreas, dominado principalmente por el brezo (*Erica arborea*), la faya (*Myrica faya*, figura 2.14. C), la tovisca (*Daphne gnidium*), el acebiño (*Ilex canariensis*) y la malfurada (*Hypericum grandifolium*). Se encuentra en cotas superiores a la laurisilva y en zonas del monteverde afectadas por la actividad humana donde es demasiado seco para la laurisilva. Se encuentra en todas las islas excepto en Fuerteventura y Lanzarote.

Pericallido murrayii-Myricetum fayae.

Pericallido: peri (alrededor) y kalli (hermoso). *Murrayii*: Richard Paget Murray. *Myricetum*: bosque de taray. *Fayae*: faya.

El fayal de altitud se encuentra por encima del monte verde húmedo, sobre los 1300 m. Está presente en Tenerife, La Gomera, La Palma y El Hierro. Está formado mayoritariamente por la faya (*Myrica faya*), el brezo (*Erica arborea*) y el acebiño (*Ilex canariensis*), y en La Gomera, La Palma y El Hierro se encuentra la faya herreña (*Myrica rivasmartinezii*).

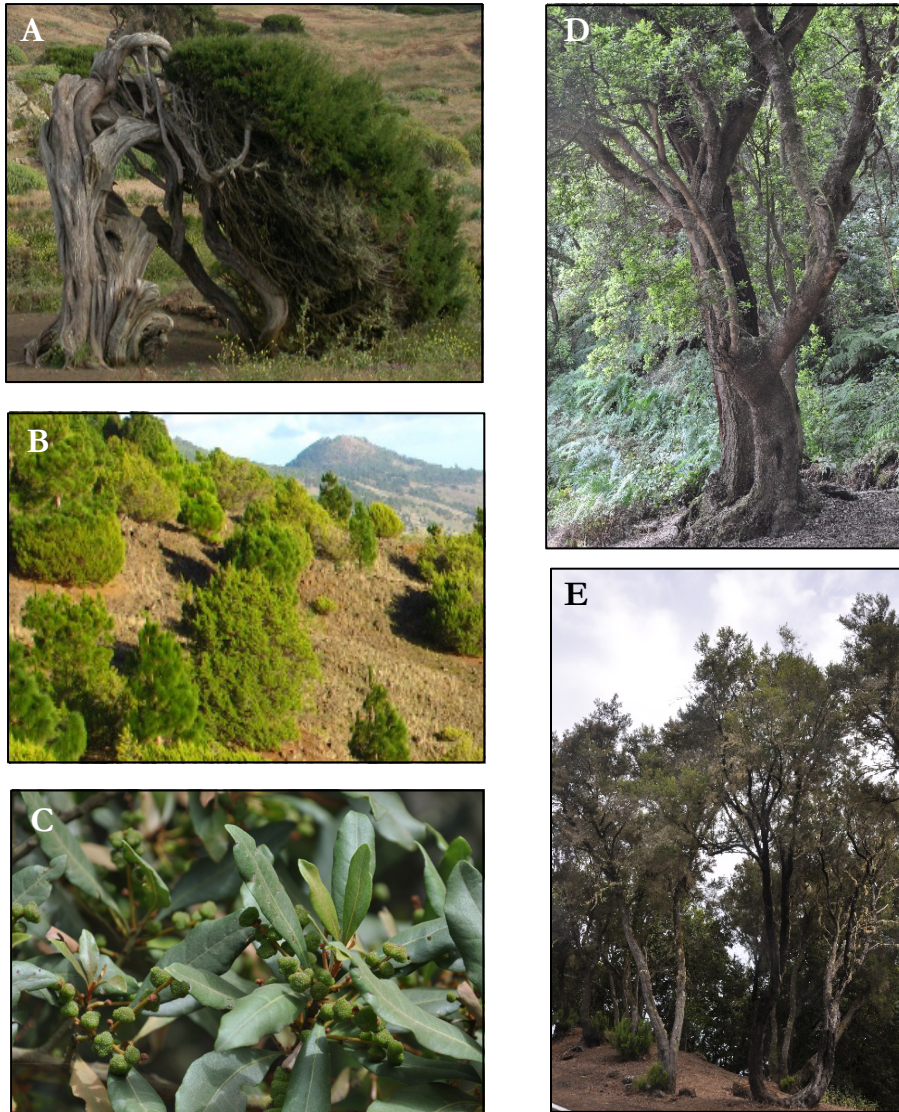


Figura 2.14. (A) *Juniperus turbinata* en La Dehesa, (B) pino canario en El Julan, (C) faya, (D) laurisilva y (E) fayal-breza.

3. FUNDAMENTOS DE TELEDETECCIÓN

*“Consideramos que es una certeza que la Tierra,
encerrada entre polos,
está limitada por una superficie esférica”.*

Nicolás Copérnico.

3.1. INTRODUCCIÓN.

Se define la teledetección como aquella técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores aéreos o espaciales. No sólo incluye los procesos que permiten obtener una imagen, sino también su posterior tratamiento e interpretación. Los sistemas de teledetección espaciales incluyen: fuentes de energía que detecta el sensor, cubiertas terrestres, sistemas sensor, sistemas de recepción, intérprete y usuario final (Chuvienco, 2010).

Las ventajas que aporta la observación espacial son:

- Cobertura global y exhaustiva de la superficie terrestre.
- Perspectiva panorámica.
- Observación multiescala y no destructiva.
- Información sobre regiones no visibles del espectro.
- Cobertura repetitiva.
- Transmisión inmediata.
- Formato digital.

Hay que considerar ciertas limitaciones ya que, si no se producen cambios en la energía reflejada o emitida por la cubierta, las magnitudes que son función de esta energía no variarán. En consecuencia, debe haber una modificación de las características espectrales de la cubierta para que se pueda detectar mediante teledetección (Chuvienco, 2010).

3.2. RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA.

La radiación electromagnética representa campos eléctricos y magnéticos propagándose en el vacío a la velocidad de la luz (c) y a c/n (n índice de refracción) en un medio cualquiera. Su dirección de propagación es perpendicular al campo eléctrico y magnético, que a su vez son perpendiculares entre sí y están en fase (figura 3.1), siendo el cociente entre los módulos instantáneos del campo eléctrico y el magnético, igual a la velocidad de la luz.

Las ondas electromagnéticas se diferencian por su frecuencia (f , número de ciclos por unidad de tiempo) y su longitud de onda (λ , distancia entre dos picos de onda sucesivos). El periodo de una onda (T) es el tiempo necesario para que una onda completa pase por un punto concreto, y se expresa en segundos. Estas tres magnitudes están relacionadas:

$$\lambda = c / f$$

$$T = 1 / f$$

La amplitud de una onda (A) es la máxima distancia desde su posición media.

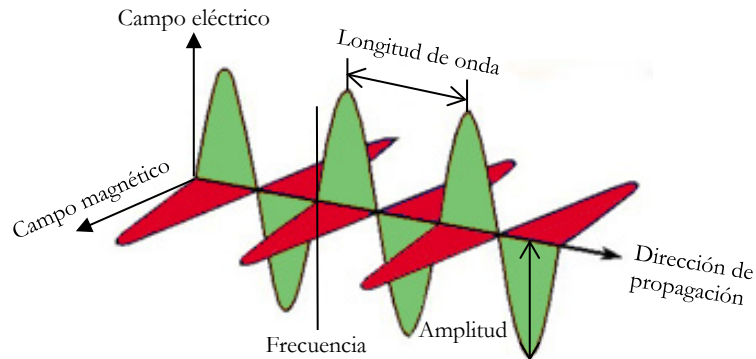


Figura 3.1. Onda electromagnética propagándose en un medio homogéneo e isotrópico.

Su naturaleza dual, onda según la teoría de Maxwell y corpúsculo según la teoría de Einstein, explica su propagación. El comportamiento de las ondas depende de las dimensiones relativas de la longitud de onda y de los objetos físicos que se encuentran a su paso.

Estas ondas se emiten por cuantos de energía, llamados fotones¹, siendo su energía:

$$E = h \cdot f = h \cdot c / \lambda$$

(f frecuencia, h constante de Planck, $6,626 \cdot 10^{-24}$ J·s, c velocidad de la luz en el vacío, $299.792.458$ m/s, λ longitud de onda).

La energía asociada con la radiación electromagnética es la energía radiante, medida en Joules (J). La proporción de transferencia de energía de un sitio a otro es el flujo de energía, expresado en watts (W). La densidad de flujo radiante es la cantidad de flujo radiante (proporción de radiación electromagnética transferida) que incide o emite una superficie por unidad de área, expresado en watts por metro cuadrado (W/m^2). La irradiancia es la energía radiante que incide sobre una superficie y se mide en W/m^2 . Cuando el flujo de energía está lejos de una superficie, se utiliza el término emitancia medido en W/m^2 , y la relación entre la emitancia de una superficie y la que ofrecería un emisor perfecto (cuerpo negro) a la misma temperatura, es la emisividad. La radiancia es la energía radiada en una dirección para un área determinada y un ángulo sólido de medida. Es una magnitud que mide el sensor y se expresa en $W/m^2 \cdot sr$ (Chuvieco, 2010). La energía total incidente por

¹ Partícula elemental que constituye la radiación electromagnética según la mecánica cuántica.

unidad de superficie es la reflectancia, y la reflectividad es una proporción adimensional, entre la emitancia y la irradiancia. Cuando hay que comparar series temporales de imágenes hay que convertir los valores de radiancia en reflectividad. Si estas variables se refieren a una longitud de onda en concreto, hay que preceder el término espectral, por ejemplo, radiancia y reflectividad espectral.

3.3. ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO.

La radiación electromagnética produce al entrar en interacción con la materia espectros de absorción y de emisión. Estos espectros son de características muy diferentes para distintas longitudes de onda de la radiación. Por lo tanto, como la longitud de onda depende del medio en que se propagan, las ondas electromagnéticas se caracterizan por su frecuencia. En el vacío, todas las ondas electromagnéticas se propagan a la velocidad de la luz, y como la longitud de onda y la frecuencia están relacionadas ($c = \lambda \cdot \nu$) se pueden caracterizar por la longitud de onda en el vacío, constituyendo el espectro electromagnético. En la figura 3.2 se observa el conjunto de longitudes de onda de todas las radiaciones electromagnéticas y en la tabla 3.1 sus principales características.

Los rayos gamma tienen longitudes de onda más cortas variando de 10^{-10} m hasta más de 10^{-14} m y las frecuencias más altas conocidas. Son los más penetrantes y son emitidos por los núcleos radioactivos. Los rayos X van de los 10^{-9} m hasta los 10^{-12} m, siendo una radiación ionizante emitida por los electrones. Gran parte de esta radiación es absorbida o dispersada por la atmósfera, permitiendo la vida en la Tierra. Debido a los efectos de dispersión y absorción de la atmósfera no son utilizados por los satélites.

La radiación ultravioleta cubre la región del espectro comprendida entre $3,8 \cdot 10^{-7}$ m (violeta) y $6 \cdot 10^{-10}$ m (rojo), se produce por átomos y moléculas en descargas eléctricas.

El espectro visible comprende desde los 380 nm hasta los 780 nm, siendo el ojo humano más sensible sobre los 550 nm que corresponde a la zona del verde. Se produce por el ajuste interno de los electrones más periféricos de los átomos y las moléculas. Los colores primarios corresponden al rojo (600–780 nm), verde (500–600 nm) y azul (500–380 nm). En teledetección casi no se utiliza la banda del azul, ya que los rayos de luz son dispersados por la atmósfera produciendo turbiedad, efecto que afecta más al extremo del azul, y mucho menos al extremo del rojo.

La radiación infrarroja va desde los 10^{-3} m hasta los 780 nm, es emitida por rotaciones y vibraciones moleculares y por los cuerpos calientes, por lo que todos los cuerpos las emiten en mayor o menor grado según la temperatura a que se encuentren. Los límites del infrarrojo son arbitrarios, ya que están determinadas principalmente por el tipo de

tecnología que emplean los detectores. Se pueden destacar tres bandas: infrarrojo cercano (780–1.200 nm, permite distinguir masas vegetales y concentraciones de humedad), infrarrojo medio (1.200–8.000 nm), discriminando entre infrarrojo de onda corta (1.200–2.500 nm, permite determinar el contenido de humedad en los vegetales o los suelos) y el propiamente dicho infrarrojo medio (2.500-8.000 nm, permite detectar focos de alta temperatura), e infrarrojo térmico (8.000-14.000 nm). La banda del infrarrojo lejano permite conocer la temperatura de los objetos. Esta radiación depende de la emisividad. Mucha de esta radiación es absorbida por la atmósfera, pero un rango (con un máximo de 9.700 nm) es detectado por los satélites. También hay que tener en cuenta que además de la emisión de la superficie terrestre se produce emisión de la atmósfera. Hay que considerar que diversas propiedades de los materiales, como la capacidad y la conductividad térmica, influyen sobre la temperatura de la superficie.

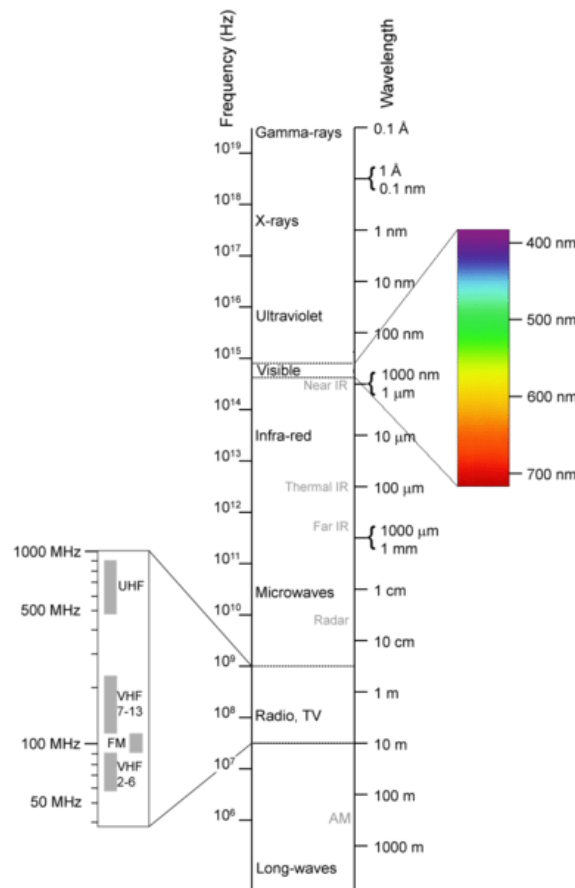


Figura 3.2. Espectro electromagnético. Fuente: Kleiner y Gilman.

Las microondas (1 mm–1 m) tienen una energía por fotón mucho menor que otras bandas utilizadas en teledetección (infrarrojo y visible). La cantidad que llega a la superficie terrestre es muy pequeña y no hay una gran dispersión en la atmósfera. La causa principal de su absorción en la atmósfera es por el vapor de agua y el oxígeno (Rees, 2001). Se puede utilizar para identificar la estructura de las plantas, distribución espacial, orientación de la

hoja, contenido de agua de la cubierta vegetal y el suelo, tipo de vegetación y cantidad de biomasa. Las microondas tienden a reflejarse de manera especular en superficies lisas del agua, con lo que no se registra señal en el detector, lo contrario que ocurre en superficies rugosas. Las microondas pueden ser polarizadas con lo que se pueden generar ondas con una orientación determinada (láser).

Las ondas de radiofrecuencia van de unos pocos kilómetros hasta los 0,3 m, se generan al acelerar las cargas a través de hilos conductores. Las microondas se extienden por encima de los 0,3 m, siendo una energía bastante transparente a la cubierta de nubes.

Tabla 3.1. Características de las ondas electromagnéticas.

Banda		Longitud de onda (nm)	Energía (J/mol)	Características
Visible		380 – 780	$3 \cdot 10^5 - 1,75 \cdot 10^5$	Visible para el ojo humano. Azul (600-780), verde (500-600), rojo (380-500)
Infrarrojo	Cercano	780 – 1.200	$1,75 \cdot 10^5 - 10^2$	Distinguir masas vegetales y concentraciones de humedad
	Medio	1.200 – 8.000		Determinar el contenido de humedad en los vegetales o los suelos y detectar focos de alta temperatura
	Térmico	8.000 – 14.000		Conocer la temperatura de los objetos
Microondas		$10^6 - 10^9$	100 - 1	Observar áreas cubiertas de nubes

A partir de la ecuación que nos determina la energía radiante de un fotón ($h \cdot c / \lambda$) podemos establecer que ha mayor longitud de onda el contenido energético es menor, por lo tanto, las radiaciones con menor longitud de onda son más fáciles de detectar ya que el contenido energético es mayor. La radiación ultravioleta es más fácil de detectar, mientras que la radiación infrarroja requiere de medios de detección más precisos.

3.4. INTERACCIÓN ATMÓSFERA-RADIACIÓN.

Entre el sensor del satélite y la superficie terrestre se encuentra la atmósfera. Cuando la radiación electromagnética se propaga en el vacío no sufre perturbaciones, pero cuando interacciona con la materia sufre interacciones y su velocidad de propagación depende del índice de refracción². La longitud de onda depende del índice de refracción del medio ($\lambda = \lambda_0 / n$). Por lo tanto, cuando la radiación electromagnética atraviesa la atmósfera, en función

² La velocidad de propagación de los campos eléctrico y magnético viene definida por la expresión $c = 1 / \sqrt{\epsilon \cdot \mu}$ (ϵ es la constante dieléctrica de un medio, μ la permeabilidad). En un medio dieléctrico y suponiendo $\mu = \mu_0$ (μ_0 es la permeabilidad del vacío, $4 \cdot \pi / 10^7$ N/A²) la velocidad es $c = c_0 / n$ (c_0 es la velocidad de la luz, n el índice de refracción).

de los elementos que estén presentes (agua, gases y polvo) modifican su longitud de onda. El agua, el dióxido de carbono y el ozono interactúan en mayor medida con la radiación electromagnética. Las interacciones entre la atmósfera y la radiación pueden originar absorción, dispersión, emisión, refracción y difracción, aunque estos dos últimos son menos importantes para el tratamiento de imágenes de satélites.

3.4.1. ABSORCIÓN.

Cuando disminuye la intensidad en un movimiento ondulatorio como consecuencia de las características físicas y el tipo del medio en el cual se propaga es debido a la absorción (Burbano *et al.*, 1993). El fenómeno de la absorción viene regulado por la ley de Kirchhoff³. Las sustancias de la atmósfera que provocan esta absorción son el oxígeno gas (filtra radiación ultravioleta), el ozono (filtra radiación ultravioleta), el vapor de agua (filtra radiación infrarroja), el dióxido de carbono (filtra radiación infrarroja) y los aerosoles (filtra el espectro visible). La absorción condiciona la observación mediante teledetección ya que se reduce a unos rangos concretos del espectro electromagnético en los cuales los valores de la transmisividad atmosférica son suficientemente altos (figura 3.3).

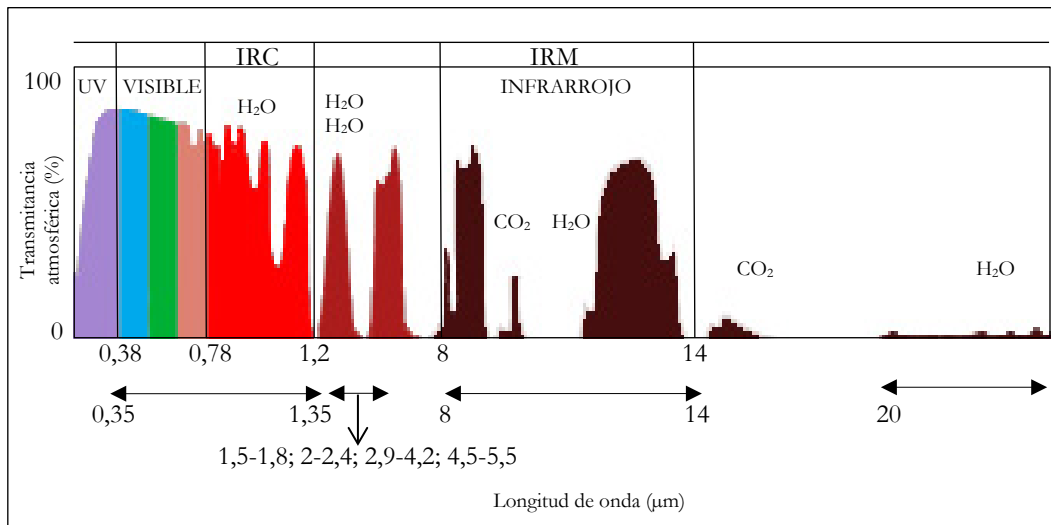


Figura 3.3. Transmisividad de la atmósfera y ventanas atmosféricas.

En la figura 3.3 se muestran los intervalos de las longitudes de onda más idóneas para la observación de las cubiertas. Son estas ventanas atmosféricas las que condicionan la obtención de valores del espectro por parte de los sensores de los satélites. Entre los valores 1,5 y 5,5 es donde hay más discontinuidad con rangos más estrechos para cada ventana atmosférica.

³ Todo cuerpo es capaz de absorber las radiaciones que emite a la misma temperatura. ($e_\lambda/a_\lambda=f(\lambda,T)$, siendo e_λ el poder emisor, a_λ el poder absorbente, T la temperatura) (Burbano *et al.*, 1993).

3.4.2. DISPERSIÓN.

Cuando la radiación electromagnética choca con las partículas atmosféricas, las ondas de distinta frecuencia se propagan con distinta velocidad. La reflexión que se produce implica un aumento de la radiancia que proviene de la superficie terrestre, aumentando la radiancia difusa y disminuyendo la directa. En consecuencia, el sensor recibe menor radiación directa de la superficie terrestre, y más radiación debido al efecto dispersor de las partículas atmosféricas. Los aerosoles y el agua son los principales elementos que originan la dispersión⁴. Además de la composición de la atmósfera, el tamaño de las partículas es un factor determinante, distinguiéndose tres tipos de dispersión:

- Rayleigh: cuando el diámetro de las partículas es inferior a la longitud de onda de la radiación. Es la que más influye en la teledetección.
- Mie: cuando el diámetro de las partículas es similar a la longitud de onda de la radiación. Las partículas que originan esta dispersión son los aerosoles y el polvo atmosférico.
- No selectiva: cuando el diámetro de las partículas es mayor a la longitud de onda de la radiación.

3.4.3. EMISIÓN.

Cualquier cuerpo con una temperatura superior al cero absoluto (-273 K) emite radiación, por lo tanto, la atmósfera emite energía. La energía a una temperatura dada se obtiene a partir de la ecuación de distribución de Planck:

$$E_{\lambda}(d\lambda) = \frac{2 \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5 \cdot (e^{h \cdot c / \lambda \cdot K \cdot T} - 1)} \cdot d\lambda$$

donde h es la constante de Planck, c la velocidad de la luz, K es la constante de Boltzmann, T la temperatura y λ la longitud de onda.

El poder emisor se determina a partir de la ley de Stefan-Boltzmann⁵, que establece que el poder emisor integral de un cuerpo negro⁶ es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta:

$$E_n = \sigma \cdot T^4$$

⁴ Ecuación de dispersión: $k^2 = \varepsilon \cdot \mu \cdot \omega^2 \cdot (1 - (\sigma / i \cdot \omega \cdot \varepsilon))$, siendo k número de ondas, ε constante dieléctrica de un medio, μ densidad lineal y superficial, ω frecuencia angular, σ densidad superficial.

⁵ Se obtiene integrando la ecuación de distribución de Planck sobre todas las longitudes de onda.

⁶ Cuerpo que para cualquier longitud de onda tiene un poder absorbente integral igual a la unidad. El cuerpo negro es el de mayor poder emisor para una misma longitud de onda y temperatura. (Burbano, 1993).

(siendo σ la constante de Stefan-Boltzmann, $5,71 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$).

Para cada temperatura existe una longitud de onda característica con la cual el cuerpo negro emite la máxima energía (figura 3.4 y 3.5).

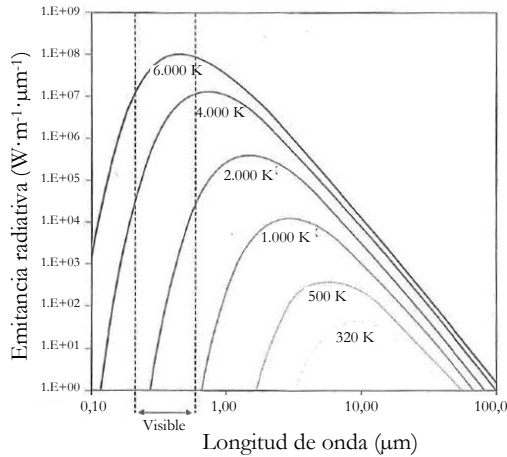


Figura 3.4. Emitancia espectral de un cuerpo negro a diferentes temperaturas. Fuente: Chuvieco, 2010.

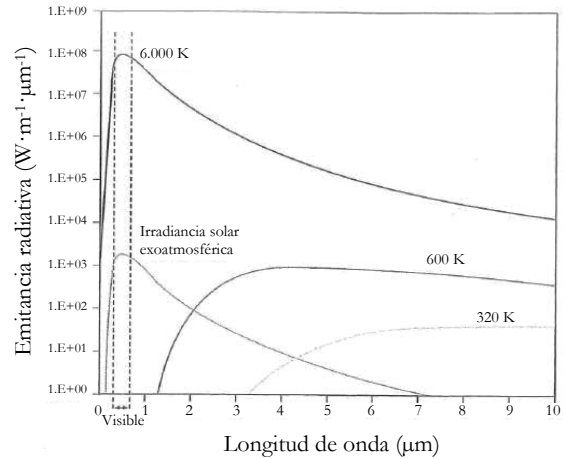


Figura 3.5. Emitancia de un cuerpo negro a 6.000 K, irradiancia solar exoatmosférica y la emitancia a temperatura terrestre y para mayor temperatura. Fuente: Chuvieco, 2010.

Pero considerar la atmosfera como un cuerpo negro es una idealización y por lo tanto se ha de realizar una corrección que consiste en considerar el poder absorbente integral (emisividad):

$$E = A \cdot \sigma \cdot T^4$$

siendo A la eficacia de la emisión, tomando el valor 1 para un cuerpo negro y 0 para un objeto que no emite ni absorbe energía, σ la constante de Stefan-Boltzmann y T la temperatura.

3.4.4. REFRACCIÓN.

Cuando la luz pasa por medios diferentes varía su velocidad, siendo menor que el en vacío. Este cambio de velocidad es la refracción. Cada sustancia posee un índice de refracción absoluto (n)⁷. Este efecto produce un cambio en la dirección de propagación generando dos ángulos, el de incidencia (formado por el rayo incidente) y el de refracción (formado por el rayo refractado). Esta variación en la dirección no se produce si el rayo incidente es perpendicular a la superficie de los diferentes medios.

⁷ $n=c/v$, donde c es la velocidad de la luz en el vacío y v la velocidad de la luz en la sustancia.

La radiación procedente de los cuerpos celestes se desvía al atravesar la atmósfera. Este cambio de dirección se determina por la ley de Snell⁸. La refracción atmosférica depende de la altitud, la temperatura, la presión, la longitud de onda y el recorrido del viento. El índice de refracción del aire disminuye con la altitud, con lo que se puede considerar la atmósfera como capas esféricas, de forma que la luz que llega a la atmósfera se desvía. Este efecto sobre la altura hace que la altura aparente sea mayor que la real⁹.

3.4.5. DIFRACCIÓN.

Cuando una onda se encuentra con un obstáculo o pasa a través de pequeñas aberturas del tamaño menor o del mismo orden que la longitud de onda los bordes del obstáculo o los orificios se comportan como nuevos focos emisores haciendo que se desvíe la onda. Este fenómeno se manifiesta en mayor medida cuanto menor sea el obstáculo. La radiación se transmite de un medio a otro de forma lateral. Aplicando el principio de Huygens-Fresnel¹⁰, cuando la radiación electromagnética interacciona con la atmósfera experimenta un cambio de dirección debido a su naturaleza ondulatoria.

3.5. INTERACCIÓN RADIACIÓN-CUBIERTA TERRESTRE.

La radiación solar que llega a la superficie terrestre es filtrada por la atmósfera, disminuyendo la radiación directa que llega al suelo. La cantidad de energía recibida en forma de radiación solar es de 1366 W/m² (1,967 cal/cm²·min). En función de la transmitancia¹¹ de la atmósfera y del ángulo cenital solar varía en cada lugar la radiación recibida. Cuando esta radiación llega a la cubierta terrestre (figura 3.6.) se origina un flujo reflejado (F_r), un flujo absorbido (F_a) y un flujo transmitido (F_t).

$$F_i = F_r + F_a + F_t$$

En unidades relativas:

$$F_i/F_i = (F_r/F_i) + (F_a/F_i) + (F_t/F_i)$$

siendo F_r/F_i la reflectividad¹², F_a/F_i la absorptividad¹³ y F_t/F_i la transmitancia.

⁸ Ley de Snell: $n_i \cdot \text{sen} \theta_i = n \cdot \text{sen} \theta$, donde n_i y n son índices de refracción, θ el ángulo de incidencia y θ_i el ángulo de refracción.

⁹ Fórmula de Bennet: $R = 60'' / \tan((b_0 + 7,31) / (b_0 + 4,4))$, $b_{real} = b_0 \cdot R$, siendo b_0 la altura aparente.

¹⁰ Los puntos de un frente de onda se pueden suponer como centros secundarios que emiten en todas direcciones ondas esféricas. Estas ondas secundarias tienen la misma velocidad, frecuencia y longitud de onda que el frente del que proceden. La perturbación total que llega a otro punto arbitrario posterior es el resultado de la interferencia de todas las ondas secundarias.

¹¹ Relación entre el flujo transmitido y el incidente.

¹² Relación entre el flujo absorbido y el incidente.

¹³ Total de energía radiada en todas las direcciones desde una unidad de área y por unidad de tiempo (Chuvieco 2010).

Por lo tanto,

$$1 = E_r + E_a + E_t$$

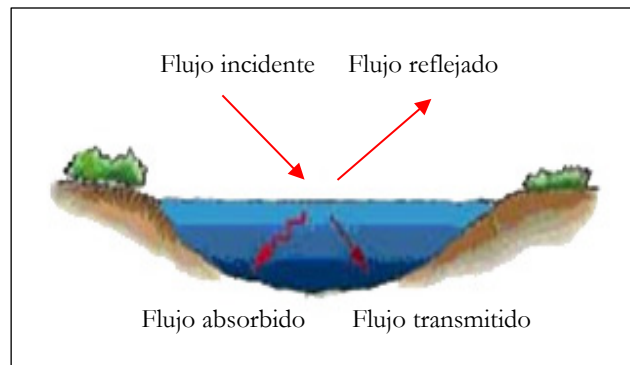


Figura 3.6. Interacción entre la cubierta terrestre y la radiación incidente.

Las tres magnitudes son dependientes de la longitud de onda y las características de la cobertura. Esto permite diferenciar cubiertas con un espectro similar. La energía que recibe el sensor depende de la reflectividad, las condiciones atmosféricas, la textura o grado de rugosidad de la cubierta y la posición del sensor. Respecto a la posición del sensor, destaca el ángulo incidente y ángulo reflejado. Si el ángulo incidente es igual al de reflexión se produce una reflexión especular, propia de superficies lisas, donde el diámetro de las partículas de la cubierta es inferior a la longitud de onda del flujo incidente, y si la energía se refleja en todas las direcciones se produce una reflexión lambertiana (figura 3.7), propia de superficies rugosas (inclinaciones), donde el diámetro de las partículas de la superficie es mayor a la longitud de onda del flujo incidente.

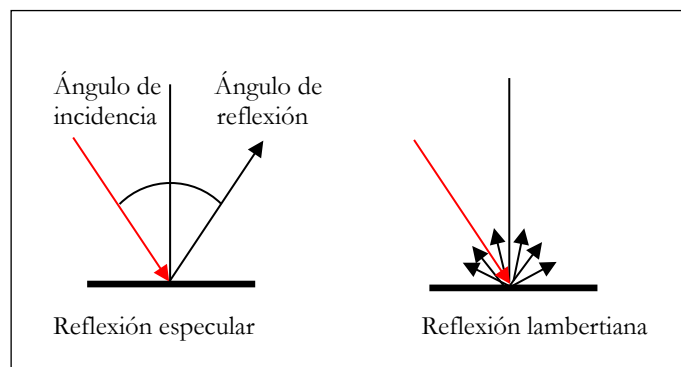


Figura 3.7. Comportamiento reflectivo.

Otros factores que modifican el comportamiento espectral de una cubierta son: ángulos de iluminación y observación, modificaciones que el relieve introduce en el ángulo de iluminación, influencia de la atmósfera, variaciones medioambientales en la cubierta y sustrato edafológico o litológico (Chuvieco, 2010). Finalmente hay que considerar la radiación de superficies próximas y de la propia atmósfera que produce la irradiancia difusa.

3.6. FIRMAS ESPECTRALES: VEGETACIÓN, SUELO Y AGUA.

Para reconocer cubiertas o características de la superficie son necesarias las firmas espectrales. En la figura 3.8 están representadas las firmas espectrales de diferentes superficies.

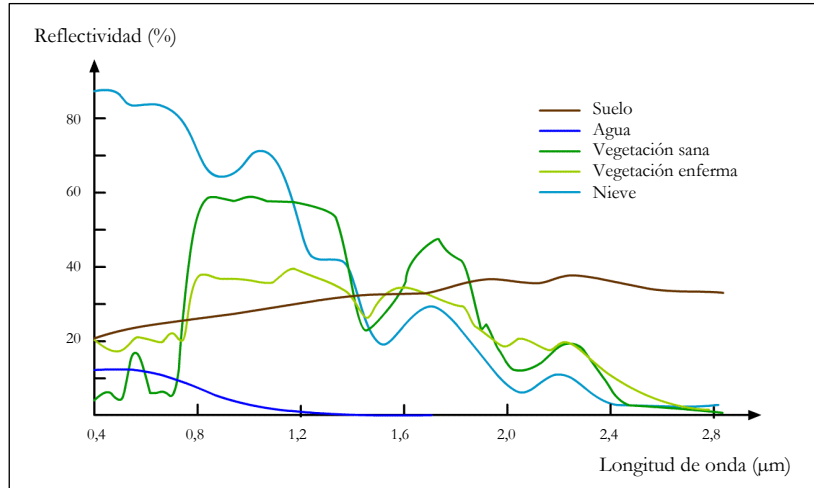


Figura 3.8. Firmas espectrales para distintas cubiertas. Fuente: Piazzese y Oñate (2004).

3.6.1. CUBIERTA VEGETAL.

Hay muchos factores que influyen en la radiancia de las cubiertas vegetales, pero se pueden dividir en tres grandes grupos (Belward, 1991):

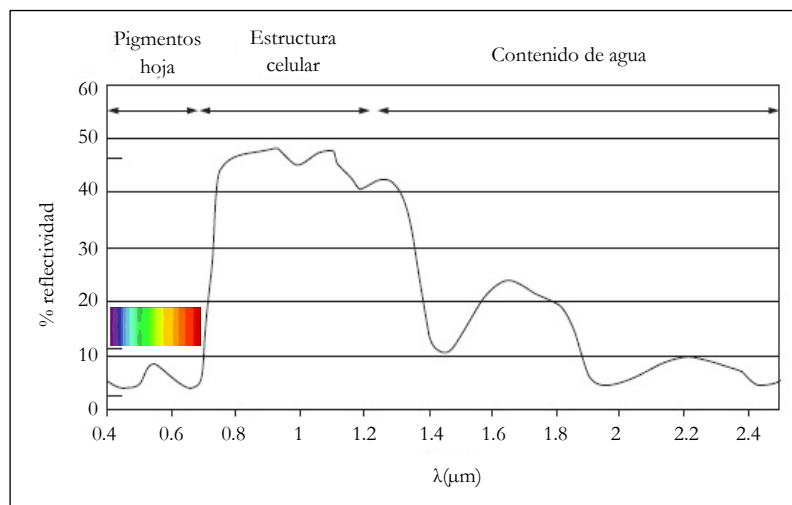


Figura 3.9. Factores que explican la reflectividad de la hoja. Fuente: Chuvieco, 2010.

Por ejemplo, los pigmentos de la hoja presentan baja reflectividad en el espectro visible. Se observa en la figura 3.9, un pico relativo a $0,55 \mu\text{m}$ que coincide con el color verde. Cuando la hoja no posee tanta clorofila adquiere importancia la estructura celular, en especial las cavidades de aire internas, dominando el infrarrojo cercano entre $0,645 \mu\text{m}$ y $1,3 \mu\text{m}$ con alta reflectividad. A partir de este valor hay una mayor absorción correspondiente al contenido de humedad.

3.6.2. SUELO.

En suelos desnudos las reflectividades dependen de la composición química, la textura, la estructura y el contenido de humedad (Labrandero, 1978). La composición química causa del color predominante, indicando una alta reflectividad en el espectro visible, por ejemplo, en los suelos calcáreos presenta mayor reflectividad en el blanco, mientras que en suelos de arcillas se presenta en el rojo. Aunque los suelos con partículas finas presentan mayor reflectividad, hay que tener en cuenta la presencia de agua como el elemento más importante. Así, en suelos arcillosos compuestos por partículas finas, tienen una baja reflectividad debido a que retienen gran cantidad de agua, en cambio, las arenas tienen una reflectividad superior al no retener agua debido a su granulometría. Además, en suelos con una coloración clara se refuerza la reflectividad.

3.6.3. AGUA.

Como se observa en la figura 3.8, la mayor reflectividad corresponde al espectro visible, en concreto en la banda del azul, reduciéndose hacia el infrarrojo cercano. A continuación, la reflectividad es prácticamente cero. La presencia de materiales en suspensión, la rugosidad de la superficie y la profundidad son los factores que más afectan a la reflectividad. En aguas de poca profundidad la reflectividad aumenta debido a que hay mayor aporte de la radiancia reflejada por los fondos. Aguas con mayor cantidad de materiales en suspensión también tienen mayor reflectividad (Chuvienco, 2010).

4. PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES DE TELEDETECCIÓN

*“Lo importante de un mapa no es lo que muestra,
es lo que esconde”.*

Ptolomeo.

4.1. INTRODUCCIÓN.

En este capítulo se describe la metodología seguida en el procesamiento de las imágenes GeoEye-1 (figura 4.1). Todas las imágenes de satélite están afectadas por interferencias que provocan errores sobre la información que se quiere obtener. Generan distorsiones en la imagen, píxeles incorrectos y alteran los valores de los píxeles. Las anomalías que se producen en la imagen pueden ser producidas por diversas causas: rotación de la Tierra, plataforma, sensor y atmósfera (Chuvienco, 2010).

Cuando se necesita trabajar con imágenes de satélite, y más con series temporales, es necesario una consistencia geométrica y radiométrica (Du *et al.*, 2002), y por lo tanto se ha de reducir sobre las imágenes las anomalías descritas anteriormente. Este proceso se realiza con las correcciones.

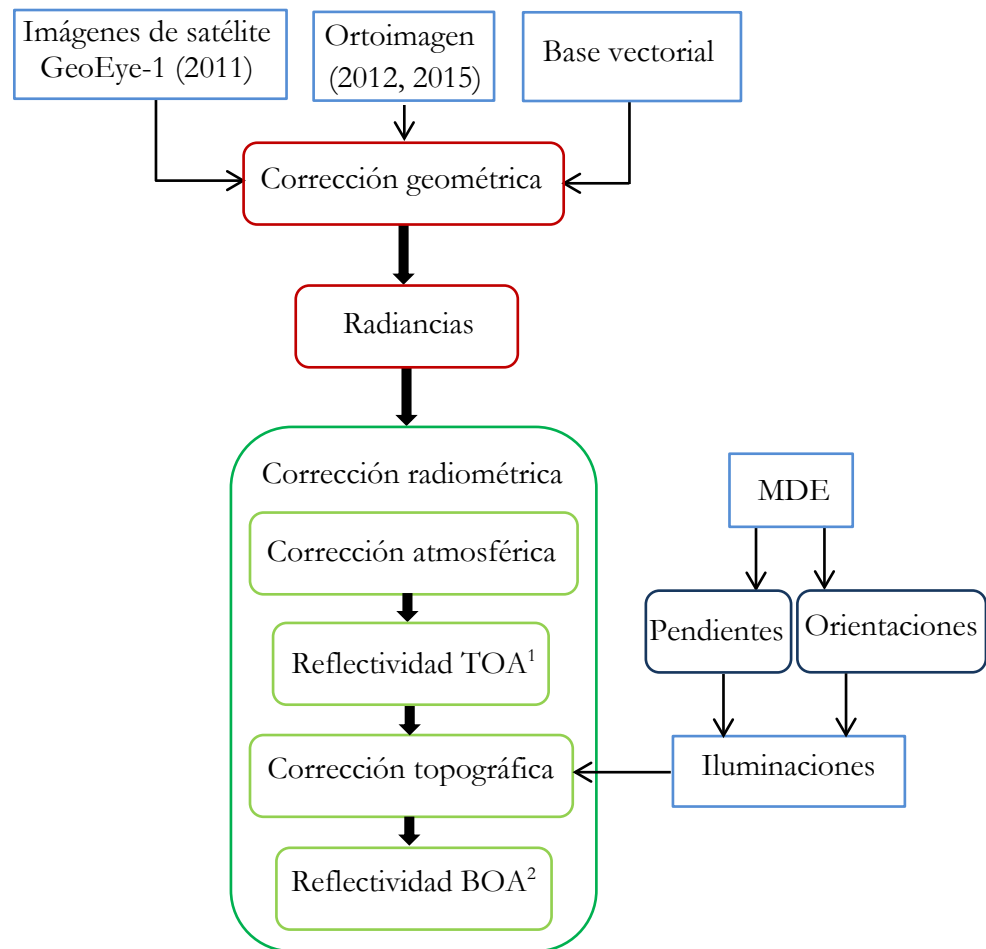


Figura 4.1. Diagrama metodológico del procesamiento de las imágenes GeoEye-1.

¹ *Top of Atmosphere*

² *Bottom of Atmosphere*

La calibración de las imágenes requiere la aplicación de diversos métodos, en función de si es una corrección geométrica o radiométrica. En el primer caso se pretende asignar a cada píxel su coordenada geográfica. A continuación, por una parte, eliminar la dispersión de la radiación electromagnética en la atmósfera, y por otra, las diferencias de iluminación.

4.2. MATERIAL.

4.2.1. ADQUISICIÓN DE IMÁGENES.

La empresa DigitalGlobe gestiona diversos satélites, entre ellos el GeoEye-1 (figura 4.2). Se han adquirido las imágenes de este satélite en formato GeoTIFF, tanto las multispectrales como las pancromáticas. El nivel de procesamiento de las imágenes adquiridas (Geo³, *Standard Geometrically Corrected*) no incluye la ortorrectificación ni la rectificación. Aunque el satélite obtiene imágenes multispectrales de 1,65 m y pancromáticas en 0,41 m, las imágenes han estado ajustadas a una resolución de 2 m y 0,5 m basada en la licencia de operación actual de GeoEye-1 con NOAA.



Figura 4.2. GeoEye-1. Fuente: DigitalGlobe (2013a).

4.2.2. SELECCIÓN DE IMÁGENES.

Se ha valorado para su adquisición que estuviesen libres de nubes (0% para la imagen Norte y 1% para la imagen Sur) (figura 4.3) y con óptimas condiciones de iluminación (19,4° y 20,8° de acimut). La selección ha sido laboriosa ya que las características orográficas de la isla, con un relieve abrupto, junto con los vientos alisios hacen que se formen nubes la mayoría de los días del año. Se han utilizado 12 imágenes con muy alta resolución, 7 correspondientes a la parte norte de El Hierro realizadas el 28 de septiembre de 2011 y 5 de la parte sur tomadas el 9 de octubre de 2011, tomadas a la misma hora (tabla 4.1).

³ Se proporciona en formato RPC00B, en archivos NITF y en formato de texto con órdenes de GeoTIFF.

Tabla 4.1. Principales datos de las imágenes GeoEye-1.

	Norte	Sur
Fecha	28/09/11	09/10/11
Hora	12:03:14 UTC	12:04:07 UTC
Dirección de escaneo	Escaneo por líneas	Escaneo por líneas
Bits por píxel	11	11
Acimut solar ⁴ (°)	151,8	156,3
Elevación solar ⁵ (°)	57,2	53,7
Lado de celda (m)	2	2

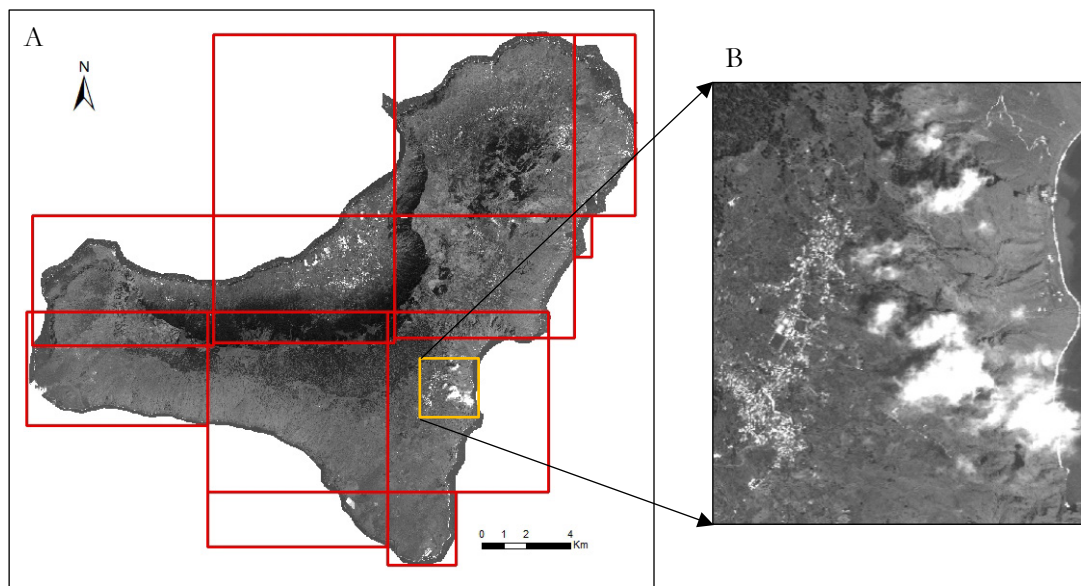


Figura 4.3. (A) Imagen Norte y Sur del GeoEye-1. (B) Zona donde hay presencia de nubes.

4.2.3. CARACTERÍSTICAS DEL SATÉLITE GEOEYE-1.

La empresa DigitalGlobe adquirió GeoEye-1 en 2013. Actualmente, es el mayor proveedor de imágenes comerciales de satélite. DigitalGlobe gestiona diversos satélites: QuickBird, WorldView-1, WorldView-2, WorldView-3, WorldView-4, IKONOS y GeoEye-1.

El 6 de septiembre de 2008 se puso en órbita en un vehículo Delta-2 en la base de Vandenberg. Realiza una órbita circular síncrona al Sol, a una altitud de 681 km pudiendo llegar a 770 km, con una inclinación de 98° y un período de 98 minutos (100 minutos a 770 km), con cruce ecuatorial local a las 10:30 horas y un periodo de revisita de menos de tres días. En un día puede almacenar 700.000 km² de imágenes pancromáticas y 350.000 km² de imágenes multiespectrales.

⁴ Ángulo acimutal solar medio desde el norte en sentido horario.

⁵ Ángulo de elevación solar medio desde la horizontal.

Tabla 4.2. Principales parámetros del GeoEye-1 para una órbita de 681 km. Fuente: DigitalGlobe (2011).

Características	Pancromática	Multiespectral
Resolución	0,41 m GSD en el nadir	1,65 m GSD en el nadir
Matriz	Lineal 24 etapas TDI	Lineal 64 etapas TDI
Rango espectral (nm)	Negro y blanco: 450-800	Azul 450-510 Verde 510-580 Rojo 655-690 IRC 780-920
Tamaño de píxel	8 μ m	32 μ m
Etapas del TDI	8,16,32,48,64	3,6,10,14,18,21,24
Agregación de píxeles	1x1, 2x2	1x1, 1x2, 2x2
Píxeles de imágenes	37.540	9.386
Ratios de líneas	20.000 y 10.000 líneas/seg	2.500 líneas/seg
Rango dinámico	11 bits por píxel	11bits por píxel por canal
Compresión	Visualmente sin pérdidas en 2,5 bpp	Visualmente sin pérdidas en 2,5 bpp por canal
Ancho de barrido	15,2 km en el nadir	
Capacidad	1 Tb	
Por órbita	524 Gb	
Área en un pase	138 x 112 km mono	63 x 112 km estéreo
Precisión de geolocalización (CE90)	5 m CE90 (especificación)	3 m CE90 (medido)
<i>Retargeting Agility</i>	Tiempo de giro 200 km: 20 seg	
Frecuencia de revisión (a 40° N Latitud)	2,6 días a 30° off-nadir	

En esta tesis se ha optado por la adquisición de imágenes del GeoEye-1 (tabla 4.2) por los siguientes aspectos:

- Las imágenes tienen mucha resolución. Esto posibilita la creación de mapas muy precisos.
- Geolocaliza propiedades a menos de 5 m. Con ello se pueden generar mapas en zonas remotas.
- Almacena y proporciona frecuentes actualizaciones de imágenes.
- Proporciona una colección estereoscópica en un solo barrido asegurando la continuidad de la imagen y la calidad.

4.2.4. PUNTOS DE CONTROL.

Para la obtención de los puntos de control se ha utilizado la ortofotografía de 2012 y 2015 del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) cedida por © Instituto Geográfico Nacional con una resolución de 0,25 m en formato TIFF (sistema de referencia geodésico REGCAN95 en Canarias) y el mapa de coberturas de 2006 de Del Arco *et al.* obtenido a partir de ortofotografías y datos de campo (figura 4.4 A). Para la validación de estos puntos

de control se seleccionaron puntos obtenidos a partir de la cartografía vectorial del © Instituto Geográfico Nacional (Base Topográfica Nacional de España-BTN25) en formato *shapefile* (.shp). Para la corrección topográfica se ha utilizado el modelo digital de elevaciones de 5 m del PNOA cedida por © Instituto Geográfico Nacional (figura 4.4 B), que se ha adaptado al valor de celda de la imagen satélite.

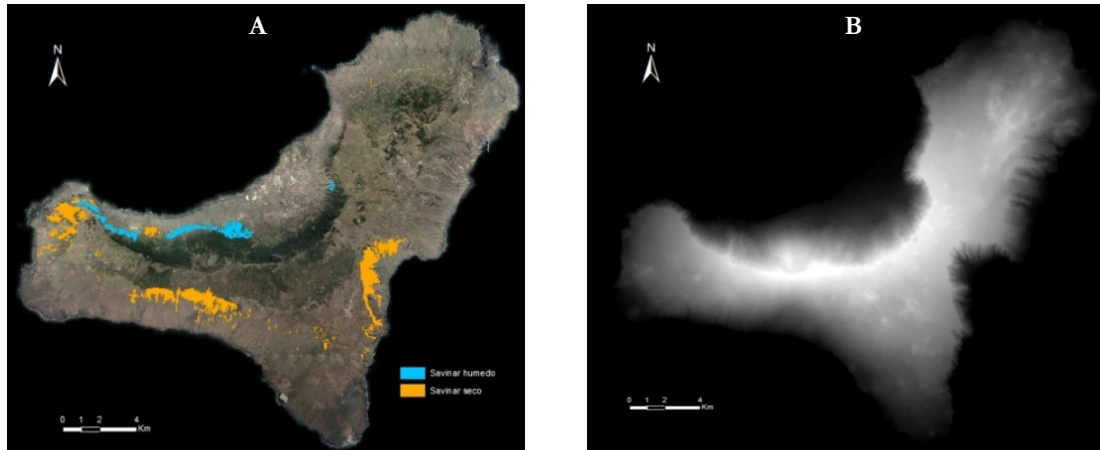


Figura 4.4. (A) Zona húmeda y seca del sabinar de *Juniperus turbinata* del mapa de Del Arco *et al.* (2006) con la base de la ortofotografía del PNOA. (B) MDE del PNOA.

En todo el proceso de corrección geométrica y radiométrica se han utilizado los entornos ArcGis 10.5 (ESRI © ArcMap 10.5), MiraMon (© Xavier Pons, 1994-2017), Idrisi Selva (Clark Labs © Idrisi Selva) y lenguaje R.

4.3. CORRECCIÓN GEOMÉTRICA.

4.3.1. INTRODUCCIÓN.

La obtención de imágenes de satélite produce distorsiones geométricas⁶. Estas distorsiones son debidas a la fuente de obtención (plataforma, sensor e instrumentos de medición) y a la superficie observada (atmósfera, topografía local, rotación y curvatura terrestre, y a las deformaciones en la proyección) (Toutin, 2004b; Chuvieco, 2010). La corrección geométrica asigna un sistema de coordenadas cartográficas a los píxeles de los datos originales de la imagen, los cuales se presentan en filas y columnas. Para resolver proyectos en los cuales son necesarias imágenes temporales, interactuar con datos auxiliares o simplemente cartografiar una imagen, se ha de georreferenciar para que su localización corresponda al terreno. Además, como los productos resultantes del procesamiento de imágenes son totalmente digitales, para realizar la fusión de imágenes de diferentes sensores

⁶Tamaño de píxel, desplazamientos de los píxeles entre su posición de órbita teórica y la real, etc.

y plataformas, e integrar los datos que tienen distintos formatos (ráster/vector), es necesario la corrección geométrica (Zitová y Flusser, 2003; Toutin, 2004b). Se ha de tener en cuenta la importancia de la calidad de este proceso ya que influye en las siguientes fases del tratamiento de las imágenes. En general la corrección geométrica consiste en dos pasos: considerar las distorsiones sistemáticas y después las aleatorias (Lillesand *et al.*, 2008).

En este trabajo se ha realizado la corrección previamente a la obtención de los resultados del estudio ya que realizar la corrección después con el objetivo de preservar los valores radiométricos es posible siempre y cuando no se haya de trabajar juntamente con imágenes de diferentes fuentes.

Se han desarrollado dos procedimientos para la corrección: métodos físicos (paramétricos) y empíricos (no paramétricos). El primero corresponde a modelos orbitales, donde las funciones matemáticas⁷ (Chen y Teo 2002; Toutin, 2003; Westin y Forsgren 2001; Bouillon *et al.* 2002; para imágenes de satélite de alta resolución) consideran todas las distorsiones, los datos provienen de los metadatos de la imagen y los errores son fáciles de localizar porque el proceso puede abordar de manera individual cada distorsión o simultáneamente. Son apropiados siempre que se dispongan de los parámetros orbitales o no se puedan determinar puntos de control debido a la presencia de nubes, a disponer de baja resolución o imágenes sin referencias. El segundo método no precisa de la información del sistema (plataforma, sensor, geometría de la adquisición de imágenes)⁸ y parte de la determinación de puntos en la imagen de satélite y en la de referencia (Cuartero y Felicísimo, 2003; Moré y Pons, 2012; Sitayeb y Belabbes (2018), utilizan este modelo en imágenes Landsat 8 en cobertura heterogénea con *Juniperus phoenicea*). Se han desarrollado procedimientos para automatizar la obtención de estos puntos (Gianinetto *et al.*, 2004; Long *et al.*, 2010; Pons *et al.*, 2010; Hu y Li, 2011). Su distribución, precisión y número, es esencial para asegurar la calidad de la corrección (Bernstein, 1978; Davison, 1984; Labovitz y Marvin, 1986; Moré y Pons, 2012). Referente al número de puntos, hay que tener en cuenta “*el método de obtención, el tipo y resolución del sensor, el espaciado de imagen, el modelo geométrico, el sitio de estudio, el entorno físico, la definición y precisión del GCP y la precisión final esperada*” (Toutin, 2004b).

Para relacionar las coordenadas de la imagen de satélite con las de la imagen de referencia se puede utilizar una función de transformación polinómica⁹. Este modelo es aplicable

⁷ Los modelos matemáticos para imágenes de satélite parten de las ecuaciones:

$$X = (-f) \frac{m_{11}(X-X_0) + m_{12}(Y-Y_0) + m_{13}(Z-Z_0)}{m_{31}(X-X_0) + m_{32}(Y-Y_0) + m_{33}(Z-Z_0)} \quad Y = (-f) \frac{m_{21}(X-X_0) + m_{22}(Y-Y_0) + m_{23}(Z-Z_0)}{m_{31}(X-X_0) + m_{32}(Y-Y_0) + m_{33}(Z-Z_0)}$$

siendo (X, Y) las coordenadas de la imagen; $(xy\tilde{z})$ son las coordenadas del mapa; (x_0, y_0, z_0) son las coordenadas del centro de proyección; $(-f)$ es la longitud focal del sensor y (m_{ij}) son los nueve elementos de la rotación 3-matriz ortogonal.

⁸ Posición, velocidad y altitud de la plataforma, ángulos de visión y velocidad de barrido del sensor, elipsoide y relieve de la Tierra, proyección cartográfica.

⁹ Los parámetros de transformación matemática se derivan mediante una adaptación del modelo de tendencia de mínimos cuadrados del tipo polinomio.

siempre y cuando la plataforma del sensor tenga una altitud estable (Buiten y Putten, 1996). El grado del polinomio viene condicionado por el terreno. En zonas planas es suficiente con funciones lineales simples, pero en terreno rugoso, se requieren polinomios de grado superior (Chuvienco, 1990). Este método tiene una gran capacidad de absorber las distorsiones accidentales, cosa que no ocurre con los modelos orbitales.

Para transferir a la nueva posición el valor digital se pueden utilizar diferentes métodos: vecino más próximo, interpolación bilineal, convolución cúbica, difuminado gaussiano, mayoría, mínimo, media, máximo, promedio vectorial, etc.

Se han presentado procedimientos de corrección geométrica basados en el modelo MLP¹⁰ (distribuye de forma homogénea a través de una red neuronal los puntos de control (GCP)) y a continuación el modelo RFM¹¹ (genera la imagen ortocorregida) (Gianinetto *et al.*, 2004). Otros modelos propuestos, están basados en diversas características del área, convirtiéndolas en características del punto (Zhang *et al.*, 2006) o a partir de la medición de la distancia de las características del área, como el modelo GCA¹², que puede ser utilizado para rectificar imágenes de diferentes satélites y minimiza los inconvenientes de los puntos de control.

Las imágenes proporcionadas para esta tesis son del tipo Geo, lo que representa el menor nivel de procesamiento geométrico y radiométrico, haciendo necesario la realización de correcciones. Se han determinado puntos de control a partir de puntos con coordenadas conocidas y se ha obtenido el error geométrico, ya que los metadatos de las imágenes no proporcionan todos los parámetros de la plataforma y del sensor para la aplicación de un método físico.

4.3.2. METODOLOGÍA.

Para la imagen correspondiente a la zona norte de la isla se ha trabajado con siete partes, y para la imagen del sur de la isla con cinco partes, que corresponden a las imágenes disponibles (tabla 4.3). Al trabajar en superficies más pequeñas se ha ajustado el número de puntos de control a la complejidad de la escena y se ha tenido un mayor control en la localización de posibles errores. En la figura 4.5 se muestran las fases que se han seguido para la obtención de las imágenes corregidas geoméricamente.

El error de la localización está definido por un error circular confiable del 90% (CE90), que significa que las localizaciones de objetos están representadas en la imagen dentro de la exactitud de 2 metros el 90% de las veces.

¹⁰ *Multi Layer Perception.*

¹¹ Modelo de Función Racional.

¹² Áreas de control del suelo.

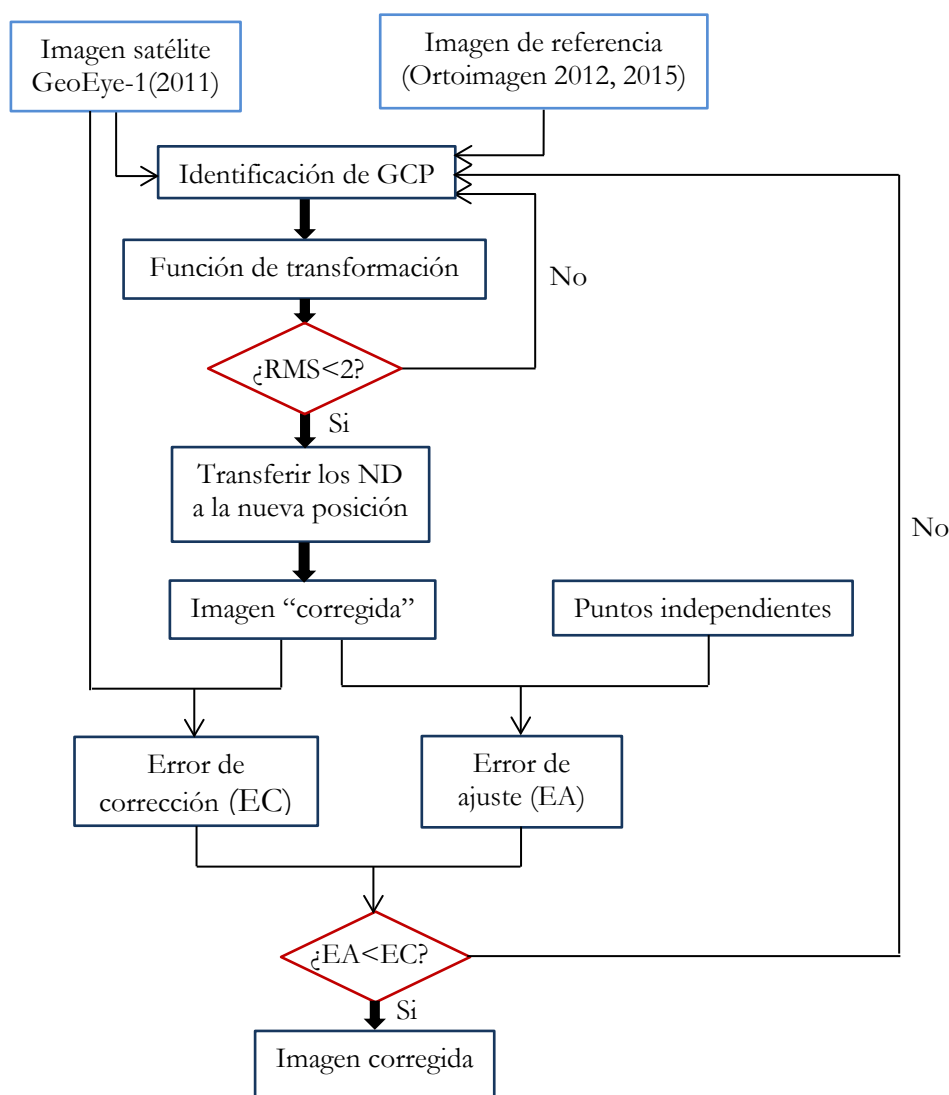


Figura 4.5. Diagrama de flujo de la corrección geométrica.

4.3.2.1. Puntos de control.

El método de corrección a partir de puntos de control establece el error de los puntos, así como la dirección y magnitud de sus efectos. Se comparan las diferencias entre las posiciones de puntos localizados en la imagen de satélite y en la imagen de referencia (Mather y Koch, 2012). Para estos puntos comunes se aplica una función de transformación. A continuación, se transfieren los ND originales a la nueva posición (Chuvieco, 2010).

La localización de estos puntos se ha hecho de forma manual ya que se disponen de imágenes de muy alta resolución que aseguran la precisión de la ubicación, además de controlar la distribución de los puntos y el proceso.

Tabla 4.3. Relación de las imágenes GeoEye-1 y sus dimensiones.

Imagen	Tamaño por banda (MB)	Columnas	Filas	Tamaño de celda (m)	Superficie (km ²)
11SEP28120326-M2AS_R1C2-054197045010_01_P001.TIF	64	4.096	4.096	2, 2	67,109
11SEP28120326-M2AS_R1C3-054197045010_01_P001.TIF	64	4.096	4.096	2, 2	67,109
11SEP28120326-M2AS_R1C4-054197045010_01_P001.TIF	21,44	1.372	4.096	2, 2	22,479
11SEP28120326-M2AS_R2C1-054197045010_01_P001.TIF	46,05	4.096	2.947	2, 2	48,284
11SEP28120326-M2AS_R2C2-054197045010_01_P001.TIF	44,89	4.096	2.873	2, 2	47,071
11SEP28120326-M2AS_R2C3-054197045010_01_P001_TIF	43,31	4.096	2.772	2, 2	45,416
11SEP28120326-M2AS_R2C4-054197045010_01_P001.TIF	1,42	393	945	2, 2	1,489
11OCT09120402-M2AS_R1C1-054197045010_01_P002.TIF	40,28	4.096	2.578	2, 2	42,238
11OCT09120402-M2AS_R1C2-054197045010_01_P002.TIF	64	4.096	4.096	2, 2	67,109
11OCT09120402-M2AS_R1C3-054197045010_01_P002.TIF	56,78	3.634	4.096	2, 2	29,770
11OCT09120402-M2AS_R2C2-054197045010_01_P002.TIF	19,41	4.096	1.242	2, 2	20,349
11OCT09120402-M2AS_R2C3-054197045010_01_P002.TIF	9,76	1.548	1.653	2, 2	10,235

Se ha determinado un número suficiente de puntos de control para asegurar un correcto ajuste estadístico ya que la distorsión global implica a todos los píxeles. Su obtención se ha realizado a partir de ortofotografías del PNOA cedidas por ©Instituto Geográfico Nacional como imagen de referencia. Para obtener una correcta corrección es fundamental el proceso de selección de los puntos de control. Por ello, se han distribuido de forma homogénea en sitios no afectados por dinamismo temporal buscando morfologías específicas en la imagen (Labovitz y Marvin, 1986; Mather, 1995, Zitová y Flusser, 2003), evitando de esta manera una mayor ponderación en unas zonas, donde los ajustes tendrían poco error, en detrimento de otras. Se han seguido las recomendaciones de la guía de la Comisión Europea (Kapnias *et al.*, 2008), en la que establece: “*los puntos adecuados bien definidos pueden representar características tales como pequeños arbustos o arbustos aislados, intersecciones de caminos (esquinas) además de intersecciones en ángulo recto de características lineales y objetos circulares. Los edificios que representan desplazamiento vertical (esquinas de edificios, postes de telégrafo) no deben seleccionarse como puntos de control*”. También se han seleccionado puntos de control en zonas con diferentes alturas para minimizar el error de desplazamiento del relieve.

4.3.2.2. *Función de transformación.*

Son funciones que determinan la posición correcta, pero no transmiten el valor de cada ND. La transformación utilizada ha sido una función polinómica. Para ello se ha tenido en cuenta el tamaño de la muestra de puntos de control necesario para dar estimaciones fiables de los coeficientes, la distribución espacial de los puntos de control y la precisión con la que están ubicados. Una transformación de primer orden puede realizar rotación, cambios de escala e inclinación, traslación y reflexión, mientras que las de orden superior permiten también curvar (Schowengerdt, 1983) (figura 4.6). En función de la zona se ha determinado el grado del polinomio, utilizando un grado superior en superficies con relieve desigual para asegurar la posición (Chuvienco, 1990; Cuartero y Felicísimo, 2003).

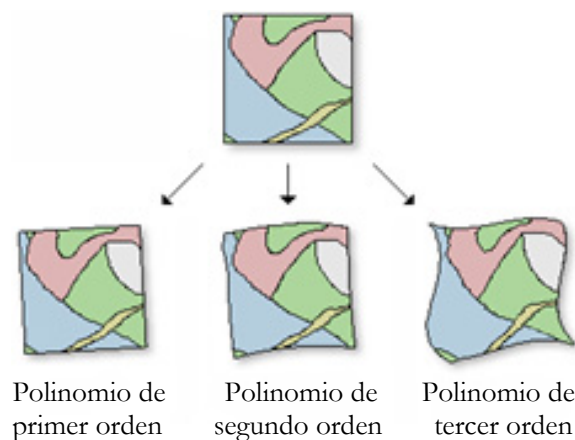


Figura 4.6. Transformaciones según el orden del polinomio. Fuente: ESRI (2016a).

La transformación polinómica es de la forma:

$$s = \sum_{j=0,n} \sum_{k=0,n-j} a_{j,k} X_j Y_k$$

donde n es el grado del polinomio y X e Y las coordenadas en la imagen.

A) Transformaciones de primer orden:

$$\begin{aligned} x &= a_0 + a_1 X_i + a_2 Y_i \\ y &= b_0 + b_1 X_i + b_2 Y_i \end{aligned}$$

donde x e y son las coordenadas obtenidas en columna y fila -variables dependientes-, X_i , Y_j son las coordenadas de la imagen de referencia en columna y fila -variables independientes- y a_0 , a_1 , a_2 , b_0 , b_1 , b_2 son los coeficientes de regresión).

B) Transformaciones de segundo orden:

$$x = a_0 + a_1X_i + a_2Y_i + a_3X_iY_i + a_4X_i^2 + a_5Y_i^2$$

$$y = b_0 + b_1X_i + b_2Y_i + b_3X_iY_i + b_4X_i^2 + b_5Y_i^2$$

C) Transformaciones de tercer orden:

$$x = a_0 + a_1X_i + a_2Y_i + a_3X_iY_i + a_4X_i^2 + a_5Y_i^2 + a_6X_iY_i^2 + a_7X_i^2Y_i + a_8X_i^3 + a_9Y_i^3$$

$$y = b_0 + b_1X_i + b_2Y_i + b_3X_iY_i + b_4X_i^2 + b_5Y_i^2 + b_6X_iY_i^2 + b_7X_i^2Y_i + b_8X_i^3 + b_9Y_i^3$$

4.3.2.3. Funciones de transferencia.

El método del vecino más próximo asigna a cada celda el ND que corresponde a la posición más próxima (figura 4.7). Cuando está situado el centro del píxel de la imagen de salida en la imagen de entrada, se determina la ubicación del centro de píxel más próximo en la imagen de entrada, asignando ese valor al píxel en la imagen de salida.

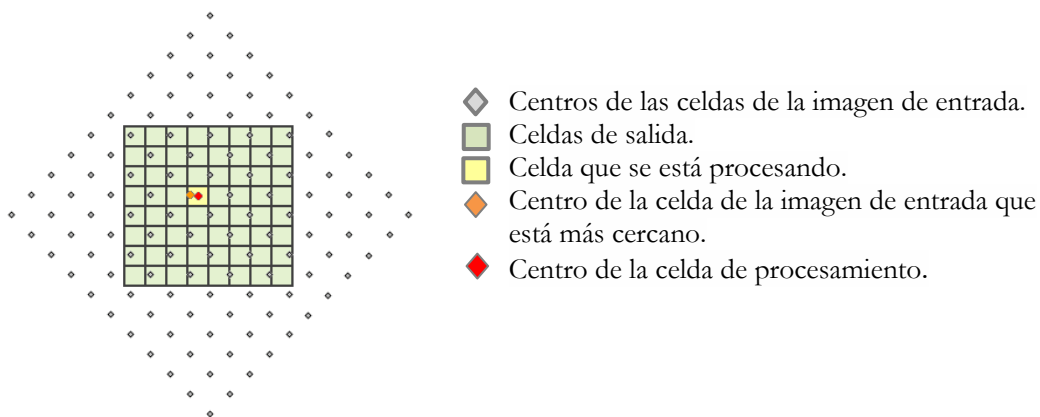


Figura 4.7. Método de interpolación para el ajuste según el vecino más próximo. Fuente: ESRI (2016b).

Este método tiene el inconveniente de que los elementos lineales originales aparecen fracturados y pueden perderse valores ya que algunos valores de píxel se repiten (figura 4.8).

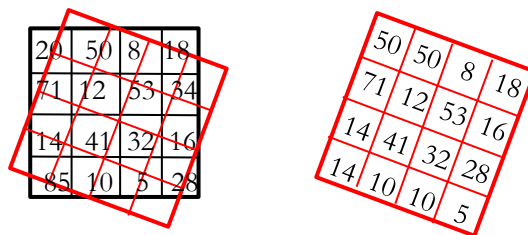


Figura 4.8. Ajuste a partir del método del vecino más próximo.

La interpolación bilineal (figura 4.9 A) realiza un promedio de los centros de los cuatro píxeles más cercanos a partir de un algoritmo de interpolación. Este método homogeniza los datos, resultando una superficie suavizada. Es apropiado para datos continuos ya que el ráster de salida se obtiene en función de la posición relativa y del valor de los píxeles del ráster de entrada.

La convolución cúbica (figura 4.9 B) realiza un ajuste de los 16 centros de celdas más cercanos. Distorsiona menos el ráster final que las otras dos funciones de transferencia, pero es más lento, interpola valores y puede haber valores externos al rango del ráster de entrada. Se utiliza para datos continuos. Debido a que intervienen más celdas para el cálculo del valor de salida que en el caso de la interpolación bilineal, esta técnica tiende a agudizar los bordes de los resultados.

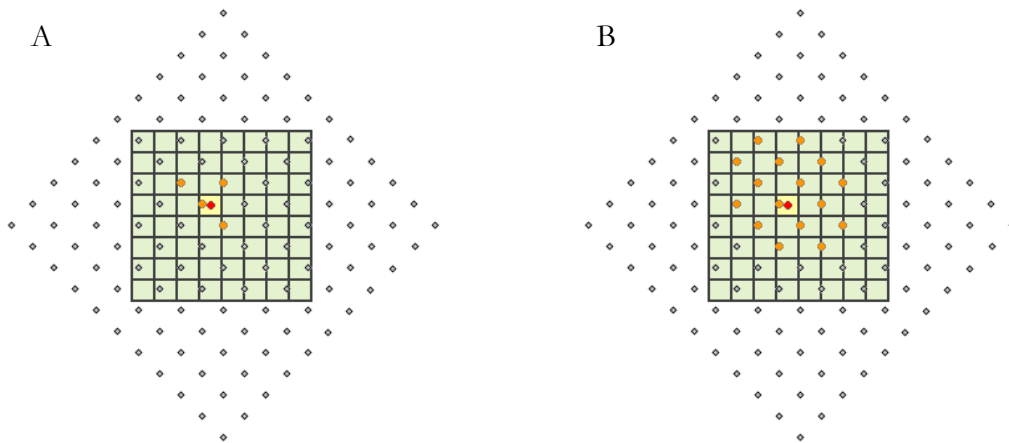


Figura 4.9. (A) Método de interpolación bilineal y (B) método de interpolación según convolución cúbica. Fuente: ESRI (2016b).

Para la transferencia de los ND a la nueva posición se ha utilizado el método del vecino más próximo (tabla 4.4), recomendado para datos discretos, ya que no modifica el ND de la imagen original porque no se utiliza un algoritmo de interpolación (traslada los ND), conservando la radiometría. Además, es un método rápido y sencillo.

Tabla 4.4. Funciones para el método del vecino más próximo, siendo $f(x,y)$ el ND de la celda (x,y) de la imagen original, $f(a,b)$ el ND de la celda (a,b) de la imagen corregida.

$f(a,b)^*$	Δx	Δy
$f(x,y)$	$<0,5$	$<0,5$
$f(x+1,y)$	$\geq 0,5$	$<0,5$
$f(x,y+1)$	$<0,5$	$\geq 0,5$
$f(x+1,y+1)$	$\geq 0,5$	$\geq 0,5$

* $a=x+\Delta x$, $b=y+\Delta y$, $0 \leq \Delta x \leq 1$, $0 \leq \Delta y \leq 1$

4.3.2.4. *Validación.*

Comprobando las coordenadas de los puntos de control obtenidos en la transformación con la imagen de referencia, se determina el error cometido. El error de la corrección geométrica se ha valorado a partir del error cuadrático medio (RMS).

$$RMS = \sqrt{(\sum_{i=1}^n [(xi - X)^2 + (yi - Y)^2])/n}$$

siendo n es el número de puntos de control.

La validación de la corrección se ha efectuado a partir de puntos de control independientes, obtenidos de la cartografía vectorial del ©Instituto Geográfico Nacional. La utilización de estas medidas permite determinar la aproximación de la imagen final (error de corrección), en contraste con otros estudios que intentan minimizar los errores sobre el ajuste (Cheng *et al.*, 2000). Hay que distinguir entre la calidad del ajuste y la final, donde en el primer caso sólo se hace referencia a los puntos de control, mientras que para asegurar una calidad final es necesario disponer de puntos independientes para poder garantizar una mejor corrección de toda la imagen.

4.3.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

Para una transformación de primer grado son necesarios como mínimo tres puntos de control, para una de segundo grado seis y para una de tercer grado diez. Para las correcciones geométricas de las imágenes del GeoEye-1 se han utilizado funciones de transformación polinómicas de segundo y tercer grado. Como el modelo aplicado no refleja la geometría de visualización y no filtra errores, se han de determinar muchos más puntos para minimizar la propagación de errores. Para la imagen Norte se han obtenido 205 puntos de control y para la imagen Sur 165. Destacar la importancia de utilizar bastantes puntos de control para asegurar la corrección, controlando los efectos que se produce en zonas alejadas de los puntos al utilizar polinomios de segundo y tercer grado. Como se muestra en la figura 4.10 (A) y (B), los puntos de control se han distribuido por toda la imagen, y se han situado en zonas no sujetas a dinamismo temporal. Para minimizar las distorsiones producidas por las diferentes cotas de los puntos se han seleccionado puntos situados en zonas con una gran diferencia de cota, aunque hay autores que recomiendan utilizar el MDE como Palà y Pons (1995) para obtener un mejor ajuste.

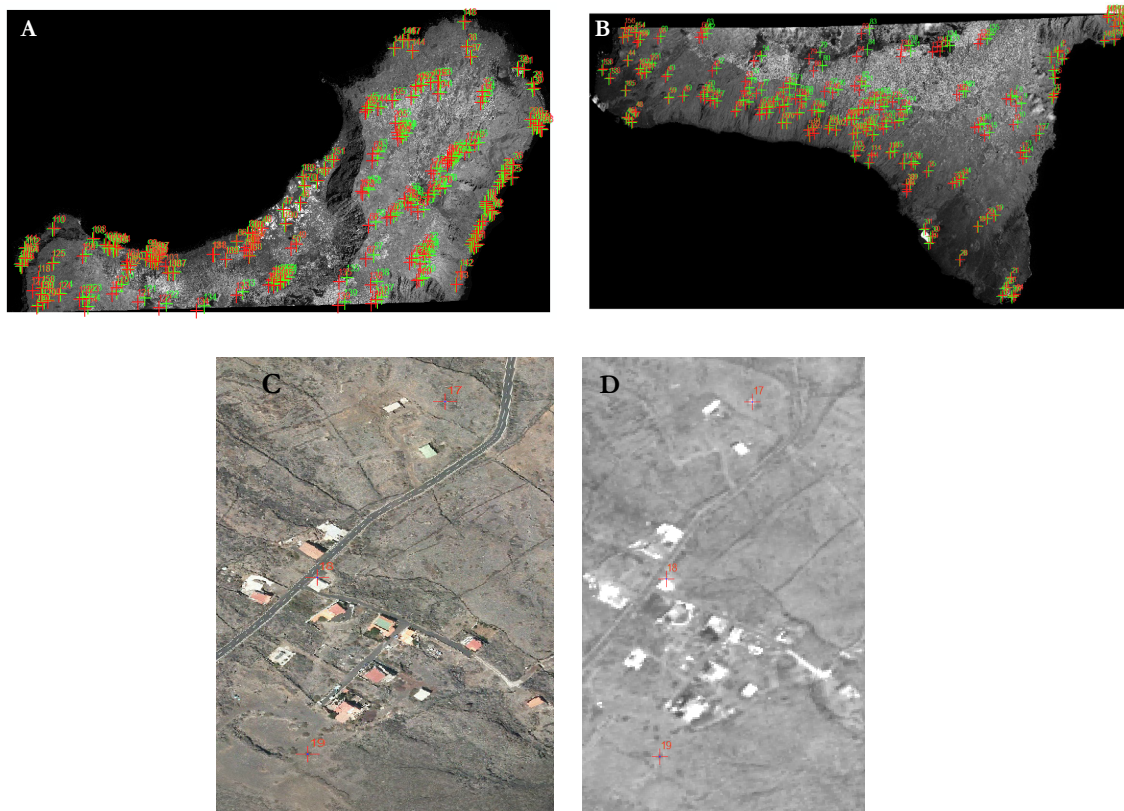


Figura 4.10. Representación de puntos de control. (A)(B) En verde la posición en la imagen de referencia (PNOA cedido por ©Instituto Geográfico Nacional) y en rojo la posición en la imagen GeoEye-1. (C) Imagen de referencia. (D) Imagen GeoEye-1.

Se ha considerado un valor válido si el error es inferior a un píxel. Como se refleja en la tabla 4.5. en todas las imágenes el error cuadrático medio es inferior a 2 m, siendo necesaria la ubicación de más puntos de control en zonas con mayor complejidad topográfica para asegurar el valor del error.

El resultado del proceso se observa en las figuras 4.11 y 4.12 (C) que corresponde a la banda 1 después de aplicar una función de transformación. El grado de estas funciones polinómicas ha variado según las condiciones orográficas de cada imagen. Aunque implícitamente se haya supuesto que las superficies son planas, se han minimizado los desplazamientos debido a la elevación mediante puntos de control en cotas medias, como proponen Ehlers y Welch (1988), y en ninguna imagen se ha superado el error de 2 m (tabla 4.5).

Tabla 4.5. Error cuadrático medio y función de transferencia para cada imagen.

Imagen GeoEye-1	RMS (m)	Ajuste
11SEP28120326-M2AS_R1C2-054197045010_01_P001.TIF	1,58752	Vecino más próximo
11SEP28120326-M2AS_R1C3-054197045010_01_P001.TIF	1,87971	Vecino más próximo
11SEP28120326-M2AS_R1C4-054197045010_01_P001.TIF	1,92306	Vecino más próximo
11SEP28120326-M2AS_R2C1-054197045010_01_P001.TIF	1,62078	Vecino más próximo
11SEP28120326-M2AS_R2C2-054197045010_01_P001.TIF	1,60984	Vecino más próximo
11SEP28120326-M2AS_R2C3-054197045010_01_P001-TIF	1,98216	Vecino más próximo
11SEP28120326-M2AS_R2C4-054197045010_01_P001.TIF	0,68697	Vecino más próximo
11OCT09120402-M2AS_R1C1-054197045010_01_P002.TIF	1,91929	Vecino más próximo
11OCT09120402-M2AS_R1C2-054197045010_01_P002.TIF	1,89895	Vecino más próximo
11OCT09120402-M2AS_R1C3-054197045010_01_P002.TIF	1,61400	Vecino más próximo
11OCT09120402-M2AS_R2C2-054197045010_01_P002.TIF	1,94443	Vecino más próximo
11OCT09120402-M2AS_R2C3-054197045010_01_P002.TIF	1,26982	Vecino más próximo

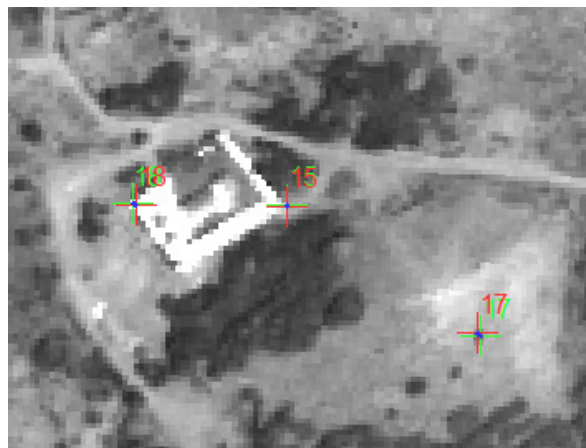


Figura 4.11. Representación de puntos de control al aplicar una transformación polinómica.

En la figura 4.12 (A), se puede observar el error planimétrico a través de un vector, con origen en la posición real y final en la corregida, siendo menor en la zona con menos pendiente y mayor en la zona que corresponde a un eje estructural de la isla. Esta dinámica se ha repetido en todas las imágenes. En la figura 4.12 (B) se representa la reducción de la

distancia a través del vector, siendo una media del 70% para un polinomio de segundo grado y del 90% para uno de tercer grado. El resultado de la transformación a nivel de toda la imagen, tanto validado a nivel visual como a partir de puntos independientes, avala la rectificación geométrica utilizando los polinomios de segundo y tercer grado. En este sentido Cuartero y Felicísimo (2003) menciona el uso de polinomios de segundo y tercer grado en la rectificación o Chuvieco (1990) que remarca la utilidad de aumentar el grado del polinomio en zonas con relieve desigual.

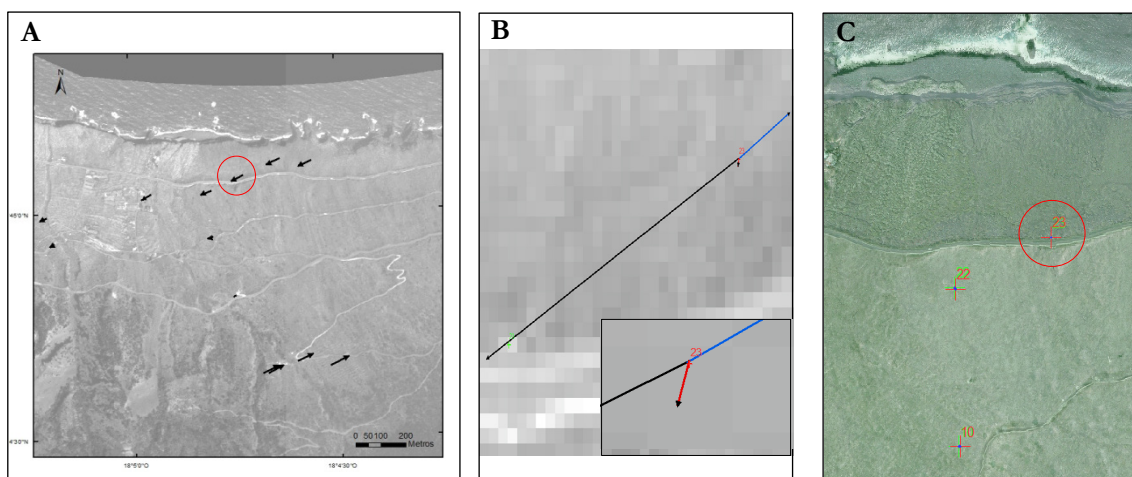


Figura 4.12. (A) Vectores de error planimétrico antes de aplicar una transformación. (B) Transformación de primer grado (negro), de segundo grado (azul) y de tercer grado (rojo). (C) Localización en El Hierro.

Como se ha mencionado en la metodología, para asignar los valores ND a la nueva posición se ha aplicado la transferencia basada en el vecino más próximo, ya que al tomar el valor del píxel que está más cerca se han conservado los valores originales. La determinación del error se ha realizado en diversas zonas de la imagen, calculando el módulo del vector entre los puntos independientes y los obtenidos antes y después de la corrección. El uso de vectores ha permitido detectar fácilmente el valor y la dirección del error, coincidiendo con el estudio de Moré y Pons (2012). Este error de corrección se ha comparado con el error de ajuste que se produce entre la imagen corregida y los puntos independientes (Cuartero y Felicísimo, 2003).

Las zonas elegidas se han establecido a partir de criterios de heterogeneidad del paisaje. En la figura 4.13 se muestran dos zonas donde se ha calculado, correspondientes al norte de La Dehesa y en Sabinosa.

Se han utilizado 29 puntos independientes en las zonas de control y se ha determinado el error medio y el error cuadrático medio (tabla 4.6). Según Moré y Pons (2012) se debe usar un número mínimo de 25 puntos independientes.

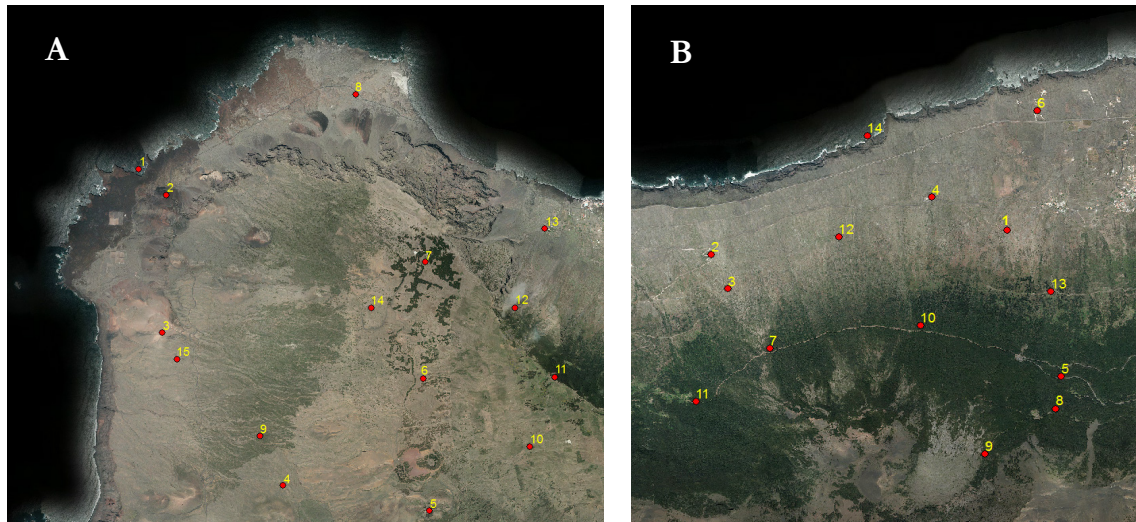


Figura 4.13. Puntos independientes donde se han realizado las medidas del error. (A) La Dehesa. (B) Sabinosa.

Tabla 4.6. Resultados del error medio (MS) y del error cuadrático medio (RMS), y la relación entre el error de corrección y el de ajuste.

	Zona A La Dehesa	Zona B Sabinosa
MS	104,6	113,9
RMS	37,4	32,1
MS/RMS	2,8	3,5

Para la Zona A se han determinado los errores de corrección y ajuste para polinomios de diferente grado (figura 4.13 A y tabla 4.7). La relación entre el MS y el RMS es mayor a medida que aumenta el grado del polinomio, coincidiendo con los resultados que obtienen Cuartero y Felicísimo (2003), siendo más acusada para el grado tres que entre el primero y el segundo. Esta mayor razón indica una mejor rectificación.

Tabla 4.7. Resultados del error medio (MS) y del error cuadrático medio (RMS), y la relación entre el error de corrección y el de ajuste en función del grado del polinomio para la Zona A.

	Grado 1	Grado 2	Grado 3
MS	119,8	88,1	104,6
RMS	95,4	57,0	37,4
MS/RMS	1,3	1,6	2,8

Independientemente del grado del polinomio el error de ajuste es inferior al de corrección, disminuyendo un 20,37% para polinomios de primer grado, un 35,30% para segundo grado y 64,24% para tercer grado. Esto indica la mejoría al realizar la corrección geométrica en la imagen original.

En la figura 4.14 (izquierda) se muestra la variación de los errores según la función polinómica, mostrando una tendencia decreciente para el RMS. El menor error medio se obtiene para el polinomio de segundo grado, pero el error de ajuste es muy inferior en el de tercer grado. Hay que tener en cuenta que la fiabilidad del ajuste queda limitada a los puntos de control y no a toda la imagen, por ello la importancia de seleccionar un número de puntos suficientes y bien distribuidos por toda la imagen. Esto hace que haya zonas de la imagen con diferentes valores del error.

Como se muestra en la figura 4.14 (derecha), el RMS aumenta al disminuir el número de puntos de control. Esto es debido a que, al tener menos puntos de control, su distribución no cubre toda la superficie, haciendo que aumente la variabilidad, mientras que al aumentar el número de puntos se estabiliza el error. En la Zona A esta estabilidad corresponde a un menor número de puntos, mientras que en la Zona B como corresponde a una superficie con fuertes contrastes en la pendiente la variabilidad afecta a más puntos.

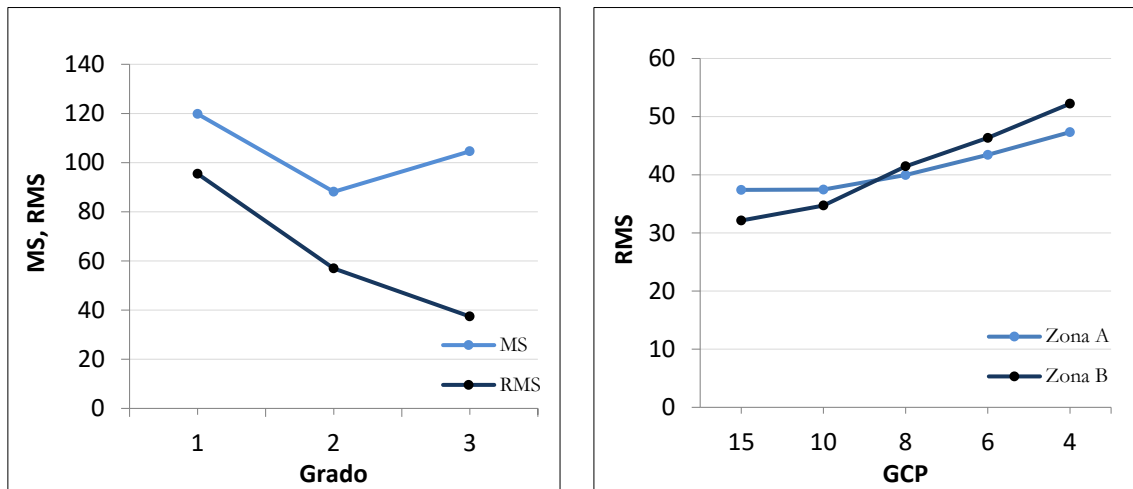


Figura 4.14. Comparación entre el error medio (MS) y el error cuadrático medio (RMS) para diferentes polinomios de transformación para la Zona A (izquierda). Variación del RMS en función del número de puntos de control (derecha).

4.4. CORRECCIONES RADIOMÉTRICAS.

Las imágenes de satélites están afectadas por la atmósfera al ser modificada la radiación electromagnética por la dispersión y absorción en los gases y aerosoles en su trayectoria de la superficie terrestre al sensor, y por el relieve y fecha de adquisición que afecta a la iluminación produciendo sombras. Por ejemplo, la realización de mapas de cobertura del suelo en áreas montañosas está muy afectada por los efectos topográficos y atmosféricos (Soenen *et al.*, 2008). Estas correcciones pretenden minimizar estos efectos (Pons y Solé-Sugrañes, 1994; Richards y Jia, 2005; Janzen *et al.*, 2006). Para ello se obtienen valores

físicos (reflectividades a nivel del suelo o temperaturas de superficie) de los ND detectados por el sensor con una precisión suficiente para poder generar productos de calidad (Chander *et al.*, 2009). Cuando no se hace, podemos obtener un análisis inadecuado, ya que la imprecisión de las imágenes produce mayor coste, tiempo y cálculos (Duggin y Robinove, 1990). Por ejemplo, tener dentro de una misma clase espectral diferentes cubiertas impide una correcta clasificación (Franklin y Wilson, 1991; Yang y Vidal, 1991; Salvador *et al.*, 1996) o disponer de imágenes de una misma superficie obtenidas en diferentes fechas con el mismo sensor con valores de intensidad diferentes. La obtención de valores físicos estándar (reflectividad TOA en lugar de radiancia espectral al sensor) hace posible la comparación de imágenes obtenidas con el mismo o diferente sensor en diferentes momentos, y con diferentes plataformas. Esto es posible porque se elimina el efecto del coseno que se produce al tener diferentes ángulos cenitales solares, se compensan los valores de la irradiancia solar exoatmosférica que se generan al haber diferencias en la banda espectral y corrige la variación de la distancia Tierra-Sol debido a las diferentes fechas de adquisición de las imágenes (Chander *et al.*, 2009).

Las correcciones radiométricas se pueden hacer de manera relativa o absoluta (Cohen *et al.*, 2003; Coppin *et al.*, 2004; Chen *et al.*, 2005a). En el primer caso se ajustan las propiedades radiométricas de las imágenes con una imagen patrón, considerando en la mayoría de los casos que la relación es lineal (Song *et al.*, 2001; Du *et al.*, 2002). Son correcciones más simples que las absolutas, pero proporcionan resultados que no permiten comparar imágenes obtenidas de diferentes sensores. Además, se necesita seleccionar puntos no sujetos a cambios temporales (PIF). Eckhardt *et al.* (1990) establece unos criterios para determinar estos puntos y Hall *et al.* (1991) un método de seleccionar los PIF de manera automática. En este estudio se ha partido de una imagen de referencia y se han ubicado suficientes puntos para que el error fuera inferior al de un píxel. En el segundo caso se determina la reflectividad absoluta, transformando los números digitales del sensor a radiancia espectral y a continuación se obtiene la reflectividad de la superficie terrestre (Richter, 1990; Song *et al.*, 2001). Para ello se utilizan valores calibrados por el sensor en algoritmos de corrección atmosférica e iluminación y coeficientes de observación geométrica.

Hay métodos que no utilizan puntos del terreno, como el modelo de Richter de corrección atmosférica (Richter, 1990), *Origin Fix with Scaling* (Yuan y Elvidge, 1996), regresión de características pseudoinvariantes (Du *et al.*, 2001; 2002) y ajuste direccional basado en la mediana.

Se han propuesto métodos de corrección para cuando no se disponga de datos fiables del clima, iluminación y características pseudoinvariantes del terreno, que aplican un modelo de transferencia atmosférica, una función simple de ajuste y diagramas de dispersión basados en funciones de regresión (Janzen *et al.*, 2006). Destacar la incorporación de métodos que automatizan el proceso de la corrección radiométrica, como Du *et al.* (2001, 2002) que

presenta un modelo para imágenes adquiridas en diferentes fechas de un mismo lugar, o Pons *et al.* (2014), que partiendo del método manual (Pons y Solé-Sugrañes., 1994) añaden un modelo de ajuste basado en valores de referencia de áreas pseudoinvariantes y un modelo espacial para la profundidad óptica atmosférica.

También se han propuesto métodos que simultáneamente hacen una corrección atmosférica y topográfica: técnica inversa+relaciones de banda (Conese *et al.*, 1993), ATCOR+DEM (Richter, 1998), 6S+DEM (Sandmeier e Itten, 1997), DOS+Minnaert (Riaño *et al.*, 2003; Gao y Zhang, 2009), DOS+Cosine (Vincini y Frazzi, 2003), ATCOR+Minnaert (Mitri y Gitas, 2004), LOWTRAN+Minnaert (Gitas y Devereux, 2006), MODTRAN+SCS (Huang *et al.*, 2008), TF+PBC (Kobayashi y Sanga-Ngoie, 2008), 6S+Cosine (Vicente-Serrano *et al.*, 2008), reflectividad efectiva simplificada (Pons y Solé-Sugrañes, 1994, y Shepherd y Dymond, 2003). En este estudio se han realizado las correcciones de manera separada, para tener una clasificación de todos los datos intermedios y un mayor control en el proceso, sobre todo en la corrección topográfica debido a la orografía que presenta El Hierro.

4.4.1. CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA.

4.4.1.1. *Introducción.*

Los elementos que componen la atmósfera provocan cambios en la radiancia original de la superficie terrestre, destacando la dispersión del flujo reflejado. La irradiancia difusa debida a objetos vecinos se suma a la irradiancia solar directa (Chuvienco, 2010). Como consecuencia de este efecto el sensor recibe un valor mayor de la señal (figura 4.15). Las moléculas de los gases atmosféricos producen la dispersión Rayleigh que es una de las principales causas de la bruma. Esto origina que el contraste de la imagen disminuya. Además, como el diámetro de las moléculas es inferior a la longitud de onda de la radiación afecta de forma más significativa a las longitudes de onda corta (Tagestad, 2000; Forster, 1984; Rees, 1990).

Parte de los gases y partículas en suspensión de la atmósfera provocan dispersión (dispersión molecular y de aerosoles) y absorción (como vapor de agua, ozono, oxígeno y aerosoles) de la radiación electromagnética (Vermote *et al.*, 1997a; Lu *et al.*, 2002). Para eliminar este efecto se realiza la corrección atmosférica (Riaño *et al.*, 2000). La absorción producida por el ozono y el oxígeno y la dispersión molecular, tiene concentraciones relativamente estables, con lo que no son los principales componentes que dificultan la corrección (Liang *et al.*, 2001).

El espesor del aerosol (Hadjimitsis *et al.*, 2002, 2007; Themistocleous y Hadjimitsis, 2013) y la abundancia de vapor de agua son las variables más importantes, siendo la dispersión de

aerosol determinante para la corrección de los datos del canal visible (Scott *et al.*, 1992). Pero poder corregir la dispersión y absorción provocada por los aerosoles resulta complicado debido a su variabilidad en el tiempo y el espacio, siendo el factor más restrictivo en la corrección radiométrica (Kaufman, 1993; Coppin y Bauer, 1994; Liang *et al.*, 1997; Song *et al.*, 2001). El rango del espesor óptico del aerosol en la Tierra es de 0 a 4 (Chin, 2009). La importancia de la absorción por el vapor de agua aumenta cuando las bandas de absorción de vapor de agua están presentes en el ancho de banda del canal de un instrumento (Scott *et al.*, 1992).

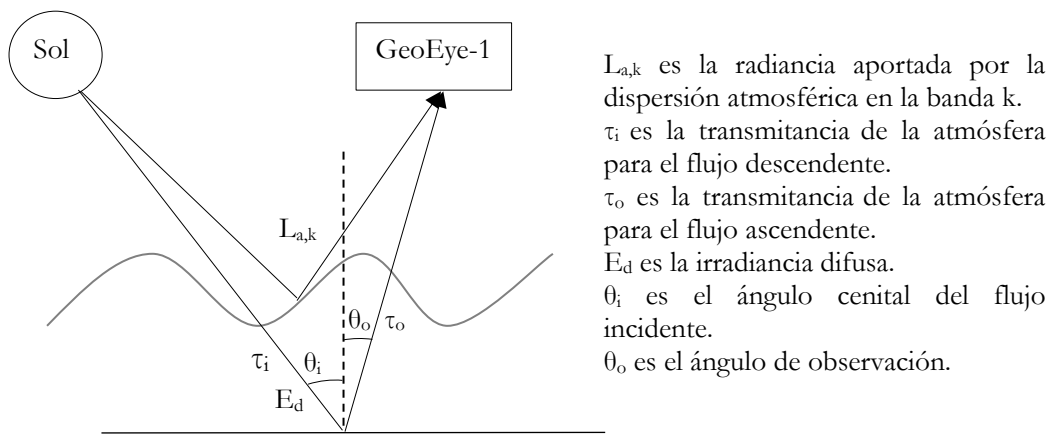


Figura 4.15. Efectos atmosféricos sobre el cálculo de la reflectividad.
Fuente: Adaptado de Chuvieco (2010).

Siempre se debe hacer la corrección atmosférica si se utiliza la imagen para generar parámetros, obtener índices espectrales y para realizar estudios temporales (Song y Woodcock, 2003; Chen *et al.*, 2005b; Schroeder *et al.*, 2006) y para hacer una correcta interpretación de las imágenes (Verstraete, 1994). En el caso de trabajar con índices de vegetación es necesaria la corrección, ya que la dispersión atmosférica afecta en gran medida a las longitudes de onda más cortas y los índices de vegetación dependen en gran parte de las bandas del espectro visible (Wicaksono y Hafizt, 2018). Pero para eliminar los efectos atmosféricos, muchas veces es necesario disponer de valores referentes a los aerosoles, vapor de agua y ozono, y generalmente no se dispone de radiosonda para la obtención de datos en el momento del paso del satélite. Además, dependiendo de las dimensiones espaciales es necesario el uso de varias radiosondas, sobre todo en zonas con relieves muy variables (Cristóbal *et al.*, 2009). Esta falta de disponibilidad de datos de entrada se ha de considerar en cualquier método de corrección que se cree.

Según Song *et al.* (2001), si se quiere realizar una clasificación de la imagen con firmas espectrales de las clases deseadas obtenidas de la propia imagen, no es necesario realizar la corrección atmosférica. En este sentido, Lin *et al.* (2015) confirman a partir de imágenes satélite de alta resolución (WorldView-2) que no es necesario para la clasificación del uso y cobertura del suelo.

Se pueden clasificar las correcciones atmosféricas (Robin, 1995; Sobrino, 2000):

- Medidas in situ. Son muy precisos ya que se obtienen datos atmosféricos en el mismo tiempo de la adquisición de la imagen.
- Imágenes de otros sensores. Miden los objetos y la atmósfera (King *et al.*, 1999).
- Modelos físicos de transferencia radiativa. Generalmente son series normalizadas de series.
- Datos de la imagen. La influencia de la atmósfera sobre los valores se obtiene de la propia imagen. Para ello se han establecido cuatro metodologías:
 - a) Cálculo del efecto atmosférico a partir de cubiertas que no presentan reflectividad.
 - b) Cálculo del efecto atmosférico a partir de la diferencia entre la absorción y la dispersión de las bandas del espectro.
 - c) Cálculo del efecto atmosférico a partir de imágenes de una misma zona en períodos y ángulos diferentes.
 - d) Cálculo del efecto atmosférico a partir de las bandas térmicas.

Hay muchos métodos para la corrección atmosférica. Cabe destacar el método Dark-Object Subtraction (DOS) (Chavez, 1996), Ground-based Dark-Object Subtraction (GDOS) (Chang *et al.*, 2008), Cosine Estimation of Atmospheric Transmittance (COST), Línea empírica (Smith y Milton, 1999), Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S (Vermote *et al.*, 1997b; Kotchenova, *et al.*, 2006, 2007; Nazeer *et al.*, 2014; López *et al.*, 2016), Dense Dark Vegetation (DDV) (Liang *et al.*, 1997), Atmospheric Correction with look-up tables (Liang *et al.*, 2001), Modified Dense Dark Vegetation (MDDV), Pseudoinvariants Features (PIF) (Schott *et al.*, 1988; Yang y Lo, 2000; Chen *et al.*, 2005a), Ouaidrari y Vermote (1999), Ridge Method (Song *et al.*, 2001), Path Radiance (PARA) (Wen *et al.*, 1999), Multivariate Alteration Detection (MAD) (Nielsen *et al.*, 1998; Canty *et al.*, 2004), Atmospheric Correction, ATCOR (Richter, 1996), Simplified Method for Atmospheric Correction, SMAC (Rahman y Dedieu, 1994), Atmospheric Correction Now (ACORN), Transmittance Functions, TF (Kobayashi y Sanga-Ngoie, 2008), Fast Line-of-Sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes (FLAASH), Atmospheric Calibration (AC) (Chang *et al.*, 2008), Quick Atmospheric Correction (QUAC) (Agrawal *et al.*, 2011), Low Resolution Atmospheric Transmission (LOWTRAN) (Kneizys *et al.*, 1988), Técnica Inversa (Gilabert *et al.*, 1994), Moderate Resolution Atmospheric Transmission (MODTRAN) (Berk *et al.*, 1998), Radiative Transfer Codes (RTCs) (Moran *et al.*, 1992). Para el presente estudio se ha realizado la técnica de Chavez (método basado en el objeto oscuro) para las bandas 1 a 4 de las imágenes GeoEye-1, ya que es un método que no requiere de datos adicionales y es sencillo, aunque asume que el efecto de la atmósfera es constante y que el único efecto es el aumento de los ND por la dispersión atmosférica. Se han realizado estudios en los que el método DOS resulta ser más eficiente que métodos como el FLAASH (Wicaksono y Hafizt, 2018).

Como se ha mencionado anteriormente, los efectos que producen los aerosoles son los más complicados de corregir. Con este fin, se han desarrollado muchos métodos sencillos considerando reflectividades estables en algunos píxeles de la imagen (*objetos invariantes* (Lavreau, 1991), pero realizan una corrección relativa al ser estadísticos y presentan dificultad para corregir la dispersión de aerosoles), la reflectividad de superficie en zonas claras y con bruma tiene el mismo valor en el histograma (coincidencia del histograma, (Richter, 1996), son simples pero cuando la composición relativa de diferentes superficies y sus reflectividades espectrales son diferentes los resultados no son correctos), para imágenes con vegetación densa (*dark-object*, (Teillet y Fedosejevs, 1995; Kaufman *et al.*, 1997) utilizado para determinar vegetación densa siempre y cuando esté ampliamente distribuida), considerando que las variaciones detectadas en el sensor en diferentes momentos en zonas donde la reflectividad de superficie es estable debido a los cambios de las propiedades ópticas de la atmósfera (*reducción del contraste*, (Tanre y Legrand, 1991) limita los cambios de reflectividad de superficie en el tiempo y el espacio al considerar condiciones generales) y elaborando una serie temporal de la profundidad óptica de aerosoles a partir de imágenes de satélite (Terra, Aqua y SeaStar) como dato previo a la corrección atmosférica (Jääskeläinen *et al.*, 2017).

Diversos estudios han utilizado imágenes de alta resolución, Wu *et al.* (2005) con QuickBird, Zhou y Troy (2008) con IKONOS, Broszeit y Ashraf (2013) con GeoEye-1, Pacifici (2013) con QuickBird, WorldView-2, Pu *et al.* (2015) con WorldView-2, Vanonckelen *et al.* (2015), Sitayeb y Belabbes (2018) con Landsat 8 sobre *Juniperus phoenicea*, entre otros. Pocos estudios hacen referencia a Canarias, entre ellos, Marino *et al.* (2016) con Landsat 8, Martín *et al.* (2012) a Tenerife con WorldView-2, Marcello *et al.* (2016) a Tenerife y Gran Canaria con WorldView-2, Eugenio *et al.* (2017) a Gran Canaria y Fuerteventura con WorldView-2 y Alonso *et al.* (2016) a Tenerife con WorldView-2.

4.4.1.2. Metodología.

A) Método del objeto oscuro.

El método del objeto oscuro parte de que las zonas de agua y sombra tienen una radiancia de casi cero ya que tienen una gran absorptividad (Chavez, 1988; Chavez, 1996). Este método se puede verificar siempre que en la imagen hallan zonas de sombra o de agua. Si se comprueba en el histograma, el valor mínimo del ND es mayor a este valor. Esta diferencia de valores es debida a la dispersión de la atmósfera, ya que los aerosoles incrementan la reflectividad aparente (TOA) de objetos oscuros y la reducen en objetos brillantes (Song *et al.*, 2001). La obtención de los ND mínimos se ha realizado a partir de los histogramas de frecuencias de cada banda (píxeles con un determinado ND), ya que informan de cómo se distribuyen los ND en cada imagen.

Aunque se produce una sobreestimación del efecto atmosférico en la banda del azul, de la misma manera que infraestima el efecto para la banda del IRC, el modelo aplicado no requiere de datos climatológicos ni meteorológicos (concentración de vapor de agua, visibilidad, profundidad de aerosol) que muchas veces no están disponibles, ya que los parámetros para la compensación atmosférica se obtienen de la propia imagen, y es un método sencillo.

B) Radiancias y reflectividades.

A continuación, se determina la radiancia para cada banda. Para ello se ha requerido de los datos de K_{nTDI} ¹³ y ancho de banda¹⁴ que proporcionan los metadatos para obtener la ganancia y el sesgo. Con los valores de ND mínimos obtenidos a partir de los histogramas, calculamos las radiancias mínimas.

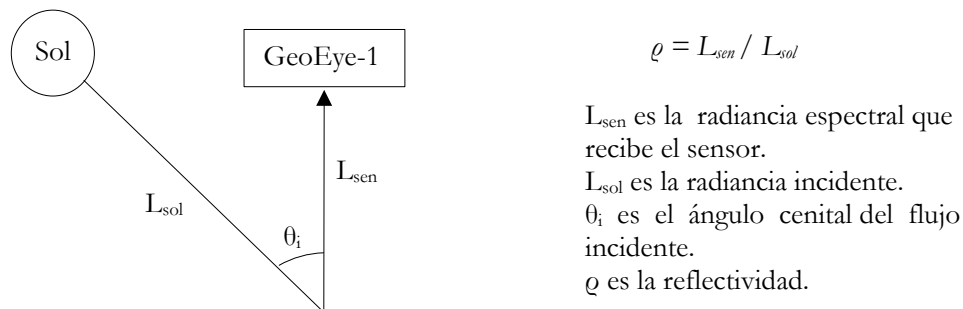


Figura 4.16. Cálculo simplificado de la reflectividad. Fuente: Adaptado de Chuvieco (2010).

$$L_{\lambda} = G_{\lambda} \cdot ND_{\lambda} + B_{\lambda}$$

donde:

L_{λ} = radiancia espectral (watts/(m²·sr·μm)).

ND = valor del número digital.

G = ganancia de la calibración radiométrica (W/m²·sr·μm).

B = sesgo de la calibración radiométrica (W/m²·sr·μm).

Los valores de G se obtienen a partir de los coeficientes de conversión obtenidos de los metadatos con la siguiente ecuación (DigitalGlobe, 2013b):

$$G = K_{nTDI} (abscalfactor) / Ancho\ de\ banda\ (effectivebandwidth)$$

siendo:

¹³ Factor que convierte los valores relativos de radiancia en radiancia absoluta. Es una radiancia de cuerpo negro calibrada a 6.000 K.

¹⁴ Amplitud de la radiación media de sus máximos rendimientos.

absclfactor = coeficiente de conversión de la radiancia relativa a absoluta ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{sr}$).
effectivebandwidth = ancho de banda efectivo (μm).

Una vez calculadas las radiancias se han de determinar las reflectividades o albedo planetario (figura 4.16). Con ello se consigue en las imágenes obtenidas con diferencia temporal eliminar los efectos del coseno de los ángulos cenitales solares y corregir la variación en la distancia Tierra-Sol, y compensar diferentes valores de la irradiancia solar exoatmosférica de las bandas (Chander y Markham, 2003; Chander *et al.*, 2009). Es una magnitud relativa, adimensional, que expresa la relación entre el flujo reflejado y el incidente. Esto implica que varía entre 0, para una superficie perfectamente absorbente, y 1, para una superficie perfectamente reflectora. El valor depende de las características físicas-químicas de la superficie y de las condiciones de observación. Como es una magnitud espectral, que varía con la longitud de onda, es diferente para cada banda.

El cálculo de la reflectividad de la superficie terrestre (BOA) se ha realizado mediante el método basado en el objeto oscuro (Chavez 1988; Chavez 1996). Este método da coeficientes de variación más bajos en el espectro visible. El modelo toma en cuenta la transmitancia de la atmósfera en el camino Sol-Tierra (depende del espesor óptico de ozono, del contenido de aerosoles, del espesor ópticomolecular y del ángulo de observación) y la dispersión atmosférica:

$$\rho_p = (\pi \cdot (L_\lambda - L) \cdot d^2) / (\zeta_2 \cdot (E_{SUN\lambda} \cdot \cos\theta_s \cdot \zeta_1 + E))$$

donde:

ρ_p = reflectividad.

L_λ = radiancia espectral ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m}$).

d = distancia Tierra-Sol en Unidades Astronómicas.

θ_s = ángulo cenital solar en grados.

$E_{SUN\lambda}$ = irradiancias solares exoatmosféricas ($\text{watts}/\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}$).

E = irradiancia difusa atmosférica debida a la dispersión ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}$).

L = radiación recibida por el sensor en un área donde sólo hay contribución de la atmósfera (área de sombra o agua).

ζ_1 = coeficiente de transmitancia atmosférica en el camino Sol-Tierra.

ζ_2 = coeficiente de transmitancia atmosférica en el camino Tierra-sensor.

Para las imágenes utilizadas, con una atmósfera clara y sin nubes, el componente principal para la determinación de los valores de la reflectividad son los diferentes valores de la irradiancia solar en la superficie del terreno (Pons y Solé-Sugrañés, 1994).

Se han utilizado los valores propuestos por Chavez (1996) para las bandas 1 a 4 para la transmitancia atmosférica en el camino Sol-Tierra (ζ_1) ya que se ajusta a las bandas espectrales del GeoEye-1. La transmitancia atmosférica en el camino Tierra-sensor (ζ_2) es el coseno del ángulo cenital del sensor. Para observaciones verticales es 1.

C) Comparativa.

Se ha determinado la reflectividad aparente a partir de la ecuación:

$$\rho = (\pi \cdot L_{\lambda} \cdot d^2) / (\zeta_2 \cdot (E_{SUN\lambda} \cdot \cos\theta_s \cdot \zeta_1))$$

y se han comparado los resultados de cada banda con la reflectividad al aplicar la corrección. De esta manera se ha podido evaluar el efecto de la corrección atmosférica en las imágenes y evaluar la eficacia del modelo utilizado.

En la figura 4.17 se muestra el desarrollo seguido para la obtención de la reflectividad.

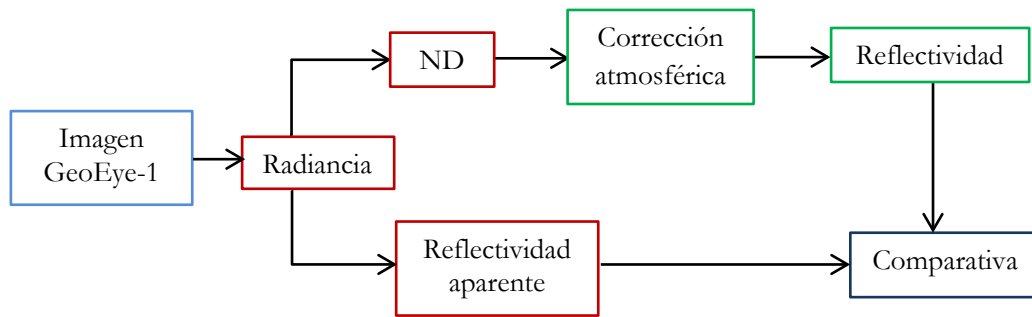


Figura 4.17. Proceso metodológico de la obtención de la reflectividad.

4.4.1.3. *Resultados y discusión.*

A) Radiancias.

Los valores de Ganancia y Sesgo para cada banda espectral a partir de los datos aportados por los metadatos para poder realizar la conversión de los ND a radiancia se presentan en la tabla 4.8.

Tabla 4.8. Valores K_{nTDI} , ancho de banda, ganancia y sesgo. Fuente: metadatos.

Banda (W/m ² ·sr)	K_{nTDI} (μm)	Ancho de banda (W/m ² ·sr·μm)	Ganancia (W/m ² ·sr·μm)	Sesgo
Azul	0,008919000	0,060	0,014865	0
Verde	0,012071500	0,070	0,017245	0
Rojo	0,005667901	0,035	0,016194	0
IRC	0,013430200	0,140	0,009593	0

B) Números digitales (ND) mínimos.

En los histogramas de las imágenes previas a la corrección atmosférica (figura 4.18) se observa que las bandas 3 y 4 presentan mayor dispersión, mientras que las bandas 1 y 2 presentan un histograma más estrecho, con una desviación típica inferior, en cambio entre las bandas 3 y 4 se produce más amplitud con valores superiores de desviación. Los valores de ND mínimos son mayores en la banda del azul y disminuyen al aumentar la longitud de onda, siendo el IRC el que presenta los menores valores, por eso las bandas más cortas presentan menor contraste.

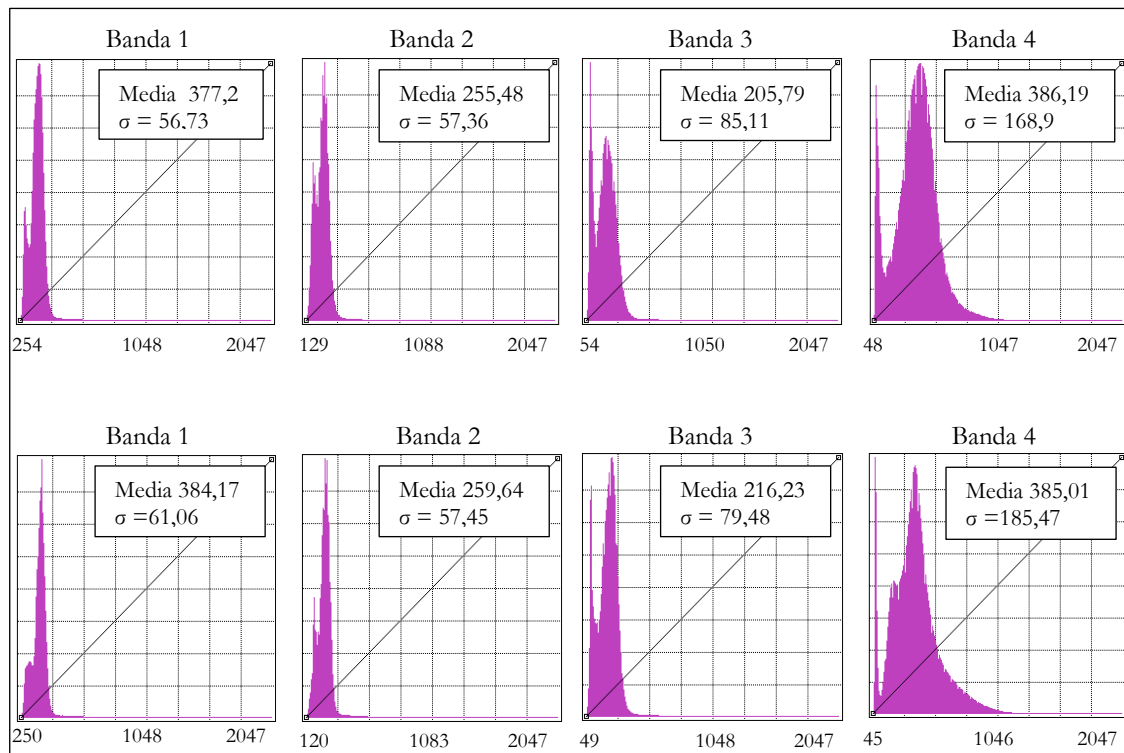


Figura 4.18. Histogramas de las bandas 1 a 4, correspondientes a las imágenes Norte (fila superior) y Sur (fila inferior).

Como se muestra en la figura 4.19 los valores mínimos relativos son mayores en las bandas más cortas, como ocurre en la dispersión Rayleigh, causada por partículas de diámetro inferior a la longitud de onda, con un 35% a 55% de la intensidad de dispersión para la banda azul, en cambio para la banda del rojo es del 10% al 20% (Campbell, 1996). Estos valores corresponden a zonas de sombra presentando su máxima absorción con valores mínimos de reflectividad (refleja poca energía). Por lo tanto, el valor mínimo se debe con mayor probabilidad al efecto de la atmósfera, correspondiendo a la radiancia atmosférica. Para las bandas más cortas el valor del ND mínimo es mayor y aumenta para las bandas más largas.

La precisión del método depende de la calidad del objeto oscuro, por ello se ha localizado la sombra más profunda posible en las imágenes. Se ha comprobado que los valores mínimos producidos por el efecto atmosférico correspondan a sombras profundas para garantizar la reducción de radiación que contribuye a la reflectividad.

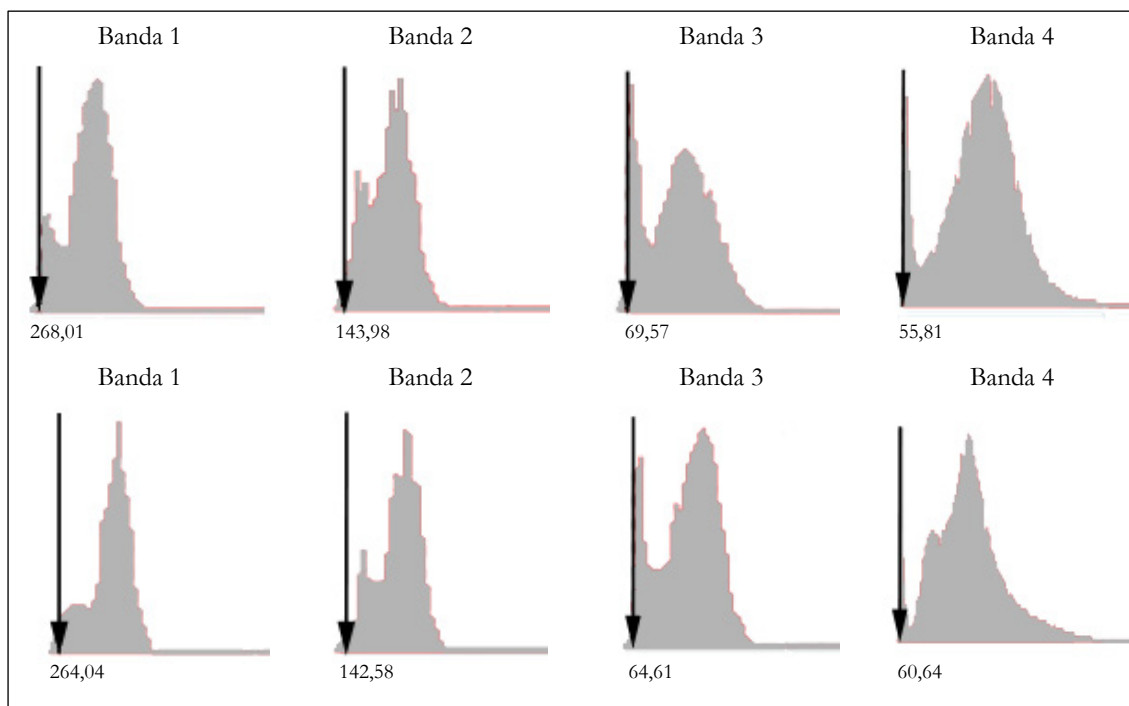


Figura 4.19. Valores atribuidos a la dispersión atmosférica de los histogramas de las bandas 1 a 4 correspondientes a las imágenes Norte (fila superior) y Sur (fila inferior).

Podemos observar como el ND mínimo de la banda 2 de la imagen Norte (valor de 144) corresponde a una zona de sombra orográfica (figura 4.20). De la misma manera se ha comprobado para las diferentes bandas. Los valores de los ND mínimos son mayores para las bandas con menor longitud de onda con lo que se obtiene mayor radiancia (tabla 4.9). Estos valores son muy similares para la imagen Norte y Sur.

Tabla 4.9. Valores de la radiancia donde sólo hay contribución de la atmósfera para la imagen Norte (negro) y Sur (azul).

Banda	ND mínimo		L(W/m ² ·sr·µm)	
Azul	268,01	264,04	3,983820	3,924955
Verde	143,98	142,58	2,482935	2,458792
Rojo	69,57	64,61	1,178516	1,094493
IRC	55,81	60,64	0,535385	0,581720

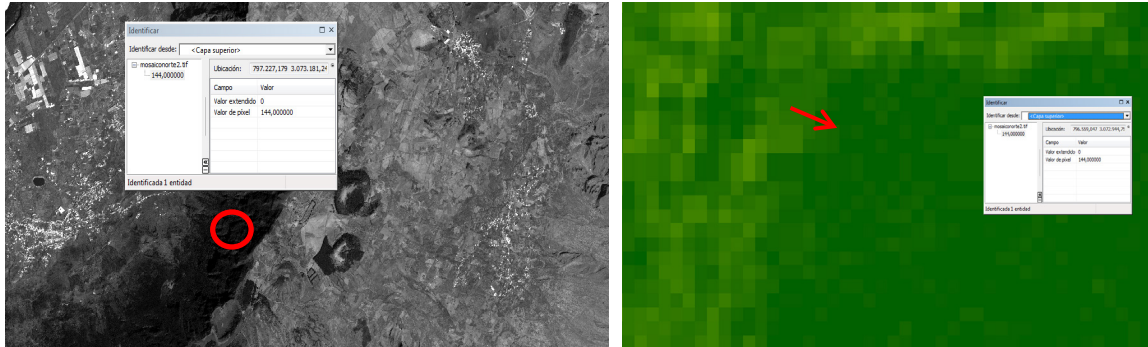


Figura 4.20. Valor mínimo para la banda 2 de la imagen Norte.

C) Reflectividades.

En las tablas 4.10 y 4.11 se muestran los valores de las variables que determinan la reflectividad para el modelo aplicado en la obtención de la reflectividad aparente y corregida.

Tabla 4.10. Valores de la distancia Tierra-Sol y del ángulo cenital solar. Fuente: Chander *et al.* (2009) y metadatos.

	Imagen Norte	Imagen Sur
d (unidades astronómicas)	1,00205	0,99890
θ_s (grados)	32,9	36,3

El método utilizado no considera ninguna pérdida para el coeficiente de transmitancia atmosférica en el camino Tierra-sensor ($\zeta_2 = 1$) ni para la irradiancia difusa ($E = 0$).

Tabla 4.11. Valores de la irradiancia solar exoatmosférica y de transmitancia atmosférica en el camino Sol-Tierra. Fuente: DigitalGlobe (2011) y Moran *et al.* (1992).

	Azul	Verde	Rojo	IRC
$E_{SUN\lambda}$ (watts/m ² ·μm)	1.960	1.853	1.505	1.039
ζ_1	0,70	0,78	0,85	0,91

Los valores obtenidos de reflectividad aparente y corregida para las imágenes Norte y Sur (figura 4.21) coinciden con los obtenidos por Prieto *et al.* (2018) y Brizuela *et al.* (2007). En el rango del espectro visible la banda azul presenta una reflectividad aparente superior y disminuye hasta el rojo presentando un mínimo. La reflectividad después de aplicar la corrección muestra el mínimo en las bandas 1 y 2 para la imagen Norte y para la banda 2 en la imagen Sur. La dispersión atmosférica afecta más a las longitudes de onda más cortas, sobre todo al visible. Como se observa en la figura 4.21 y la tabla 4.12 este efecto es más acusado para las bandas 1 y 2, disminuyendo al aumentar la banda y siendo mínimo para la

banda 4, presentando valores superiores de reflectividad. El efecto de la corrección es más evidente en las bandas cortas. Comparando la reflectividad aparente y la obtenida con el método del objeto oscuro hay una disminución de la reflectividad media tanto en la imagen del Norte como del Sur del 53,27% y 46,9% en la banda del azul, del 43,8% y 46,8% en la banda del verde, del 31,0% y 36,8% en la roja y del 2,99% y 5,8% en el IRC.

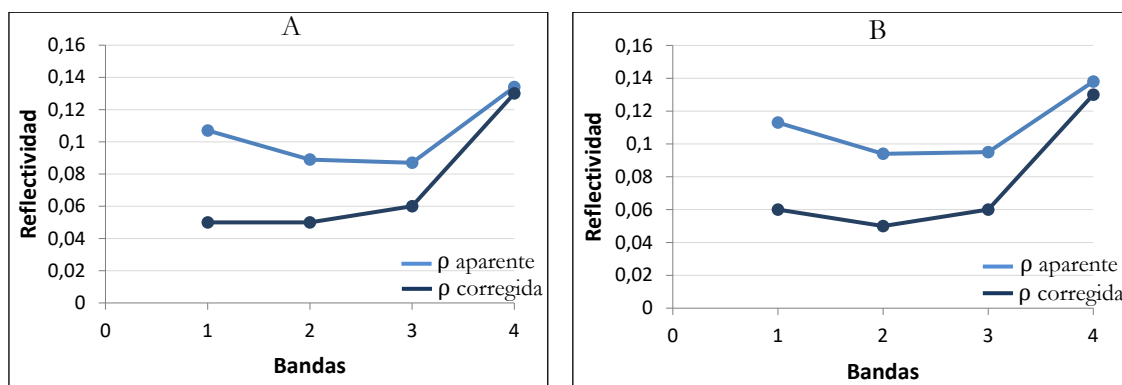


Figura 4.21. Valores de reflectividad aparente media y de reflectividad media con corrección para la imagen 4 (A) y 5 (B).

Tabla 4.12. Reflectividades medias aparentes, corregidas y SD de las reflectividades aparentes.

	Norte			Sur		
	ρ aparente	ρ corregida	SD	ρ aparente	ρ corregida	SD
B1	0,107	0,05	0,016	0,113	0,06	0,018
B2	0,089	0,05	0,020	0,094	0,05	0,021
B3	0,087	0,06	0,036	0,095	0,06	0,035
B4	0,134	0,13	0,059	0,138	0,13	0,067

Esta diferencia entre la reflectividad aparente y la reflectividad al aplicar el método del objeto oscuro se debe a que en el primer caso no hay una corrección de la absorción o la dispersión.

Las diferencias de reflectividad media entre la banda del IRC y el rojo (B4/B3) previo a la corrección son del 1,54 y del 1,45. Después de aplicar la corrección atmosférica hay un aumento significativo, siendo la relación del 2,16 para ambas imágenes. La importancia de la relación entre estas bandas es que son las que mejor caracterizan las cubiertas vegetales y determinan la mayoría de los índices de vegetación.

En la figura 4.22 se muestra la distribución de la reflectividad de la banda del rojo al aplicar la corrección atmosférica en toda la isla. Se observa que los valores inferiores corresponden a zonas con sombra, donde la orografía es más abrupta. Destaca el eje estructural NO-SE con fuertes pendientes en su vertiente norte. En cambio, en zonas donde hay poca

absortividad los valores de reflectividad son mayores. Esta tendencia se cumple para el resto de bandas.

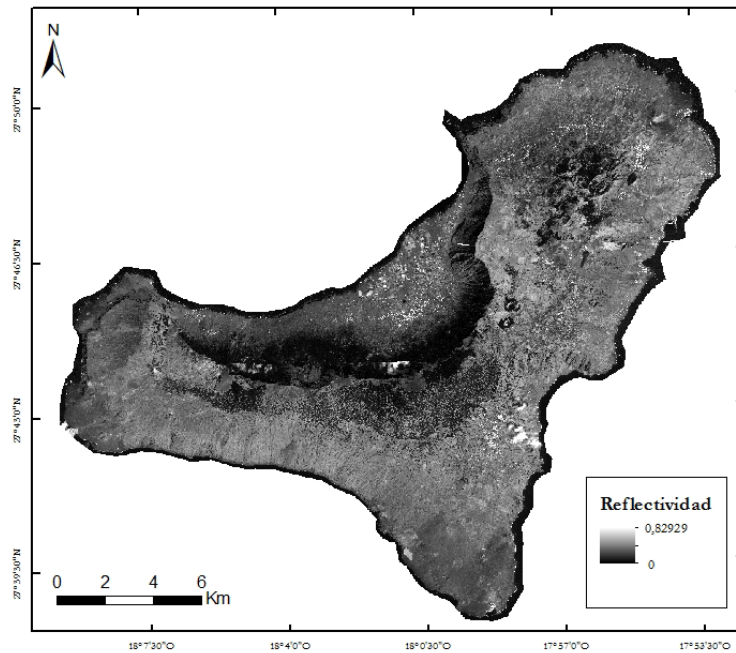


Figura 4.22. Valores de reflectividad de la isla de El Hierro correspondientes a la banda 3 al aplicar la corrección atmosférica.

4.4.2. CORRECCIÓN TOPOGRÁFICA.

4.4.2.1. Introducción.

La irradiancia solar que incide en una superficie se compone de la irradiancia solar directa, la irradiancia reflejada de superficies contiguas y la irradiancia difusa de la atmósfera. En áreas con sombra la radiación solar directa no incide en la superficie, y son las otras dos radiaciones las que forman la radiación total. En zonas soleadas los tres tipos de irradiancia constituyen el incidente total. Por lo tanto, en las zonas orientadas al Sol la reflectividad presenta valores más altos de los que corresponderían, mientras que en zonas de sombra la reflectividad es menor (figura 4.23).

Variaciones en la iluminación, producidas por el relieve y la posición del Sol y la Tierra en el momento de obtener la imagen, pueden proporcionar datos contradictorios para una misma cobertura terrestre. En terrenos abruptos estas variaciones del ángulo acimutal solar y del ángulo cenital solar, son más evidentes (Salvador *et. al.*, 1996; Townshend *et al.*, 2012), aunque también están presentes en zonas con poco relieve (Civco, 1989; Colby, 1991; Niemann, 1991).

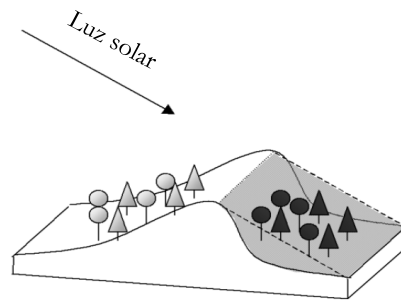


Figura 4.23. Efecto topográfico. Fuente: Chuvieco, 2002.

La topografía afecta a los valores de la radiancia, determinando los efectos de la iluminación entre diferentes zonas (figura 4.24). Los valores de radiación captados por el sensor son función de las diferencias en la iluminación de los píxeles debido a la pendiente del terreno y a la orientación (Proy *et al.*, 1989). Por lo tanto, para compensar estas diferencias de radiancia y obtener las reflectividades es necesario tener en cuenta la topografía (Justice y Townshend, 1981; Schaaf *et al.*, 1994; Riaño *et al.*, 2003; Pons *et al.*, 2014).

La reflectividad depende de la iluminación y de los ángulos de observación, siendo el ángulo de incidencia el factor más importante (Pons y Sole-Sugrañes, 1994; Chuvieco, 2010; Mather y Koch, 2011).

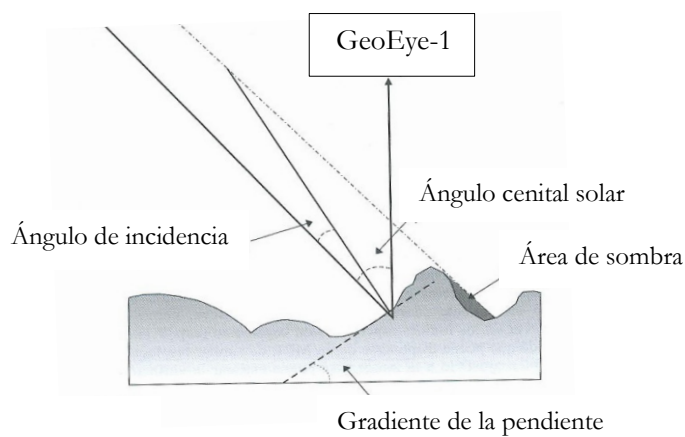


Figura 4.24. Efecto del relieve sobre la radiancia detectada por el sensor. Fuente: Adaptado de Chuvieco, 2010.

Con la corrección topográfica compensamos las variaciones de la iluminación debidas a la geometría del terreno, eliminando sombras y homogeneizando entre las zonas más y menos iluminadas (Riaño *et al.*, 2000), transformando la reflectividad de los píxeles a un plano horizontal. De esta manera los mismos objetos con diferente acimut solar tienen la misma respuesta espectral. Esto es imprescindible para que los métodos de clasificación de píxeles sean eficientes. Las propiedades biofísicas de la vegetación están modificadas por la

topografía. Se han realizado estudios para evaluar el impacto de la corrección topográfica sobre la precisión de las variables biofísicas (Ediriweera *et al.*, 2013), ya que la reflectividad después de la corrección está más relacionada con las propiedades biofísicas de la vegetación que antes. Por lo tanto, es imprescindible la corrección para la realización de mapas de vegetación a partir de imágenes de satélite.

Según Meyer *et al.* (1993), “una corrección topográfica ideal elimina todos los cambios de la iluminación producidos por la topografía para que dos objetos que tengan las mismas propiedades de reflectividad muestren el mismo Número Digital a pesar de su diferente orientación respecto a la posición del Sol. Como consecuencia visible, la impresión tridimensional del relieve de una escena se pierde y la imagen se ve plana”. Se han desarrollado diversos métodos para obtener la reflectividad equivalente a una superficie horizontal a partir de la reflectividad de una superficie inclinada. Los más simples, llamados métodos empíricos, consisten en realizar un cociente entre las reflectividades de dos bandas, ya que para una misma imagen no varían los ángulos de incidencia, a diferencia de la irradiancia difusa, la radiancia y la transmitancia atmosférica, lo que supone una aproximación en la compensación del efecto topográfico, es decir, suponen que la radiancia varía proporcionalmente en todas las bandas debido a la topografía (Teillet *et al.*, 1982; Civco, 1989; Leprieur *et al.* 1988; Short, 1982; Colby, 1991; Conese *et al.* 1993; Ekstrand, 1996; Riaño, 2003; Chuvieco, 2010). Los métodos semiempíricos consideran el ángulo de incidencia solar (Law y Nichol, 2004; Lu *et al.*, 2008; Baraldi *et al.*, 2010). Para ello se debe disponer de un modelo digital de elevaciones de alta resolución (Franklin y Giles, 1995; Chuvieco, 2010; Mather y Koch, 2011; Pons *et al.*, 2014). Los métodos físicos hacen un seguimiento de la radiancia a través de la atmósfera hasta la superficie, y viceversa (Gu y Gillespie, 1998; Soenen *et al.*, 2005; Kane *et al.*, 2008; Zhang y Gao, 2011).

Los métodos lambertianos, como el del Coseno (Teillet *et al.*, 1982), Coseno mejorado (Civco, 1989), Gamma (Richter *et al.*, 2009) y Sun Canopy Sensor (SCS) (Gu y Gillespie, 1998), C-HuangWei (Huang *et al.*, 2005), sobrecorrijen los valores de reflectividad y aumentan los efectos topográficos, y no son adecuados si se van a aplicar índices de vegetación basados en relación de bandas ya que la corrección no es específica para cada banda espectral.

La mayoría de las superficies presentan propiedades no lambertianas. En este sentido está la propuesta de Minnaert, 1941, Minnaert+SCS (Reeder, 2002), Minnaert con cambio de constantes y corrección basada en la función empírica (Ekstrand, 1996), Minnaert basado en píxeles, PBM (Kobayashi y Sanga-Ngoie, 2008), corrección C (Teillet *et al.*, 1982; Reese y Olsson, 2011), corrección C modificada (Riaño *et al.*, 2003; Veraverbeke *et al.*, 2010), corrección C basado en píxeles, PBC (Kobayashi y Sanga-Ngoie, 2008), corrección empírica *bidirectional reflectance distribution function* BRDF (Danaher *et al.*, 2001), corrección Empírico-Estadística (Teillet *et al.*, 1982), modelo b (Vincini *et al.*, 2002), *Processing Scheme for Standardised Surface Reflectance* (PSSSR) (Flood *et al.*, 2013), Sun Canopy Sensor (SCS) (Gu y

Gillespie, 1998), Sun Canopy Sensor+C (Soenen *et al.*, 2005), *Aspect Partitioned* (Hale y Rock, 2003) y *Three-factor*+C (Zhang y Gao, 2011), entre otras.

Una corrección topográfica perfecta no debería modificar las características espectrales del terreno (Riaño *et al.*, 2003; Richter *et al.*, 2009). La manera más efectiva de corregir los efectos topográficos es a partir de medidas de reflectividad de propiedades de los diferentes tipos de vegetación, integrando el ángulo solar, el albedo del terreno y todos los factores de elementos potencialmente importantes (Shultis, 1991; Dymond *et al.*, 2001). Ningún método ha demostrado ser totalmente efectivo para imágenes de diferentes áreas y tiempos, ni bajo condiciones de poca iluminación, y en terrenos muy abruptos ninguno de los anteriores métodos da una mejor corrección (Richter *et al.*, 2009; Zhang *et al.*, 2011).

Se han realizado pocos estudios en las islas Canarias, como Marino *et al.* (2016) que aplican el modelo Fmask (Zhu *et al.*, 2015) para eliminar las sombras como paso previo a la generación de mapas de modelos de combustible de imágenes Landsat 8 y ALS, Alonso *et al.* (2016) aplican una ortorrectificación para producir mapas de combustible con WorldView-2 y Díaz *et al.* (2015, 2018) desarrollan un nuevo método basado en una malla de triángulos para eliminar las sombras producidas por la orografía y las nubes en Tenerife a partir de imágenes Landsat 8. La orografía de El Hierro presenta las cumbres en la parte central de la cresta de El Golfo, siendo el Malpaso su máxima altitud con 1.501 m., con pendientes muy pronunciadas en su vertiente norte, generalmente cubiertas por nieblas producidas por los alisios del noreste. En contraposición, los sabinars de La Dehesa se encuentran con menores pendientes. Este contraste topográfico produce variaciones de la iluminación generando sombras, que obliga a realizar la corrección topográfica.

En este trabajo se han seleccionado dos modelos de corrección topográfica: corrección C y corrección Empírico-Estadística. En este sentido, Sola *et al.* (2016) compara nueve métodos de corrección topográfica y Hantson y Chuvieco (2011) compara tres métodos, concluyendo que los métodos Empírico-Estadístico y la corrección C son los que proporcionan mejores resultados. Ambos métodos consideran la superficie no lambertiana y requieren de un modelo digital de elevaciones. Para ello se han tenido en cuenta los siguientes aspectos:

- Las imágenes GeoEye-1 nos proporcionan cuatro bandas, a diferencia de otros satélites de alta resolución que cubren un mayor espectro. El coeficiente C se ajusta a las bandas espectrales de las imágenes, siendo por lo tanto una constante para cada banda, que se obtiene de los términos de una recta que tiene como variables la reflectividad y la iluminación. Los mismos valores de la recta se aplican al método Empírico-Estadístico, con lo cual también se ajusta a las bandas espectrales de las imágenes.
- Estudios recientes (McDonald *et al.*, 2000; Riaño *et al.*, 2003; Gao y Zhang, 2009; Hantson y Chuvieco, 2011; Sola *et al.*, 2014) han demostrado que, tanto para una

sola imagen como para datos multitemporales, el método de corrección C y el Empírico-Estadístico son los más idóneos.

- Parten de diferentes premisas, con lo que aseguran que la corrección seleccionada garantizará la calidad de los siguientes procesos.
- Son modelos simples de aplicar y muy extendida su aplicación, con los que se han obtenido buenos resultados (Soenen *et al.*, 2005; Baraldi *et al.*, 2010).

4.4.2.2. Metodología.

A) Modelo digital de elevaciones (MDE).

Se ha descargado el MDE del PNOA cedido por ©Instituto Geográfico Nacional con una resolución de 5 m, generado por interpolación a partir de los tipos de terreno de vuelos LIDAR con el sistema geográfico de referencia REGCAN95 y proyección UTM. Se ha remuestreado a 2 m para tener el mismo tamaño de píxel que las imágenes GeoEye-1 y se ha ajustado según las áreas de las dos imágenes. Como demuestra Sola *et al.* (2015), este último paso es muy importante para asegurar la calidad de la corrección, ya que aparecen artefactos lineales con errores de un píxel, sobre todo en las zonas donde la orientación tiene un cambio muy acusado. Además para la determinación de cubiertas vegetales la mayoría de índices de vegetación utilizan la banda del IRC, y es esa banda la que se ve más afectada por estos errores.

B) Iluminación.

A partir del ángulo de iluminación podemos determinar la corrección, lo que implica disponer de un modelo digital de elevaciones (Civco, 1989; Colby, 1991) para conocer la orientación y pendiente de cada píxel. Se ha determinado las condiciones de iluminación mediante el coseno del ángulo de incidencia, con lo cual el rango de la iluminación oscila entre 1 (máxima iluminación) y -1 (mínima iluminación). Este valor se ha calculado a partir de la relación:

$$IL = \cos \gamma_i = \cos \Theta_i \cdot \cos \Theta_p + \sin \Theta_i \cdot \sin \Theta_p \cdot \cos (\Phi_a - \Phi_o)$$

donde:

- γ_i = ángulo de incidencia.
- Θ_i = ángulo cenital solar.
- Θ_p = ángulo de la pendiente.
- Φ_a = ángulo acimutal solar.
- Φ_o = ángulo de orientación.

Los ángulos Θ_p y Φ_o se han obtenido a partir del mapa de pendientes y de orientaciones, y

los ángulos Θ_i y Φ_a de los metadatos de las imágenes.

C) Reflectividades.

Una vez obtenida la iluminación hay diversos métodos para homogeneizar los valores de la reflectividad. Una manera simple es considerar la superficie lambertiana, es decir, la superficie refleja la radiación de una manera difusa. El problema es que producen una corrección excesiva, particularmente en áreas en que la iluminación es escasa, donde el terreno es escarpado y los ángulos de incidencia pueden aproximarse a 90° (Holben y Justice, 1981; Teillet *et al.*, 1982; Civco, 1989; Duguay y LeDrew, 1992; Meyer *et al.*, 1993; Law y Nichol, 2004; Twele *et al.*, 2006). Por lo tanto, no deben utilizarse métodos lambertianos para el seguimiento de la vegetación, además, no corrigen en los índices de vegetación los efectos topográficos al no ser específicos de cada banda (Goslee, 2012). La mayoría de los objetos de la superficie terrestre presentan propiedades de reflectividad no lambertianas.

C.1) Corrección C.

Este método deriva del método del Coseno (Smith *et al.*, 1980; Teillet *et al.*, 1982):

$$\rho_{HI} = \rho_p \cdot \left(\frac{\cos \Theta_i}{\cos \gamma_i} \right)$$

Introduce un coeficiente c_k para tener en cuenta la irradiancia indirecta sobre el flujo solar total que incide (Teillet *et al.*, 1982) y, por lo tanto, disminuir el efecto de sobrecorrección en zonas con poca iluminación (Meyer *et al.*, 1993). El método de corrección C se expresa por el siguiente algoritmo:

$$\rho_{HI} = \rho_p \cdot \left(\frac{\cos \Theta_i + c_k}{\cos \gamma_i + c_k} \right)$$

donde c_k es una relación lineal entre los datos espectrales y el coseno del ángulo de incidencia solar (γ_i), $c_k = b_k / m_k$, b_k y m_k son el término independiente y la pendiente de la recta $\rho_p = b_k + m_k \cdot \cos \gamma_i$.

Al ser un método no lambertiano asume la rugosidad de las superficies, aunque requiere más complejidad de cálculo frente a los métodos lambertianos. Se han propuesto variantes para la corrección C, como Veraverbeke *et al.* (2010) que cambia las características espectrales de las imágenes, considerando el valor máximo del $\cos \Theta_i$, es decir, con el valor 1, o Riaño *et al.* (2003) que tiene en cuenta la sobrecorrección que se produce en las pendientes con poca iluminación variando el cálculo de la iluminación para suavizar la pendiente.

Debido a la capacidad de las imágenes de iluminación y de reflectividad, para poder procesar la regresión lineal, se han dividido en polígonos (cuatro para cada imagen) en función de la orografía.

C.2) Corrección Empírico-Estadística.

El método Empírico-Estadístico (Teillet *et al.*, 1982) tiene por ecuación:

$$\rho_{HI} = \rho_p - b_k - m_k \cdot \cos \gamma_i + \rho_m$$

donde ρ_m es la reflectividad media de cada banda, γ_i es el ángulo de incidencia solar, y m_k y b_k son la pendiente y la ordenada de la regresión lineal $\rho_p = m_k \cdot \cos \gamma_i + b_k$.

Es un método estadístico que asume la linealidad entre reflectividad e iluminación, sin sobre corregir las imágenes, y que requiere de un modelo digital de elevaciones ya que se necesita el ángulo de incidencia. Al igual que el método anterior, la corrección Empírico-Estadística también considera el comportamiento no lambertiano del terreno y, por lo tanto, la dependencia de la reflectividad con los ángulos de incidencia y observación, obteniéndose valores más realistas.

D) Validación.

Hay muchos procedimientos para evaluar la corrección topográfica (Sola *et al.*, 2016). En este estudio, para determinar la corrección que disminuye la sombra topográfica se ha realizado una comparación visual (Tan *et al.*, 2013; Ediriweera *et al.*, 2013; Shepherd *et al.*, 2014), un análisis estadístico y un análisis de correlación (Gao *et al.*, 2014). En el primer caso determinamos la bondad de cada corrección (no son necesarios datos auxiliares), y en el segundo caso podemos cuantificarlo. Se ha calculado la desviación estándar, el índice de dispersión, el valor medio, la diferencia relativa de la radiancia media (RDMR), el índice de correlación entre el ángulo de iluminación y la reflectividad, la variación de reflectividad antes y después de la corrección y el valor de p . El índice de dispersión se ha calculado con la ecuación:

$$ID = (SD/\rho_m) \cdot 100$$

siendo ρ_m los valores medios de la reflectividad ($W \cdot m^{-2} \cdot mm^{-1}$) y SD la desviación estándar ($W \cdot m^{-2} \cdot mm^{-1}$). La diferencia relativa de la radiancia media con la ecuación:

$$RDMR = [(\rho_c - \rho_s) / \rho_s] \cdot 100$$

donde ρ_c es la reflectividad corregida y ρ_s sin corregir.

El proceso metodológico seguido para la obtención de la imagen corregida a partir del modelo de corrección C y del Empírico-Estadístico se muestra en la figura 4.25.

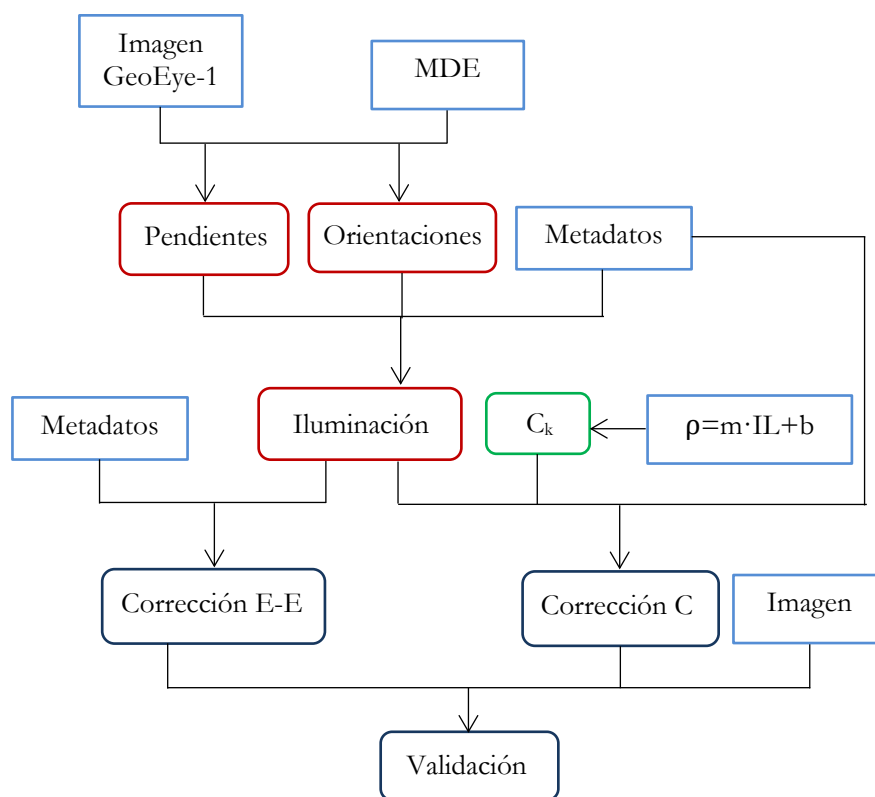


Figura 4.25. Proceso metodológico de la corrección topográfica.

4.4.2.3 Resultados y discusión.

A) Método de corrección C y Empírico-Estadístico.

Para la corrección se ha utilizado un modelo digital de elevaciones con una resolución de 5 m. Las características se muestran en la tabla 4.13.

Tabla 4.13. Estadísticas del MDE, la pendiente, la orientación y la iluminación.

		Media	SD	Mínimo	Máximo
MDE (m)		363,1	414,7	0	1.499,8
Pendiente (°)	Norte	19,7	15,4	0	87,3
	Sur	19,5	13,8	0	87,3
Orientación (°)	Norte	163,9	125,8	-1	360
	Sur	172,2	83,9	-1	360
Iluminación	Norte	0,72	0,20	-0,46	1
	Sur	0,81	0,15	-0,49	1

En esta fase hay que tener en cuenta que el ajuste entre las imágenes y el modelo digital de elevaciones es posiblemente más importante que la propia corrección, ya que afecta directamente en la iluminación y en la orientación. Para poder procesar la regresión lineal entre la reflectividad y la iluminación y obtener el coeficiente c_k para el método de corrección C, se ha dividido la imagen en ocho zonas (figura 4.26).

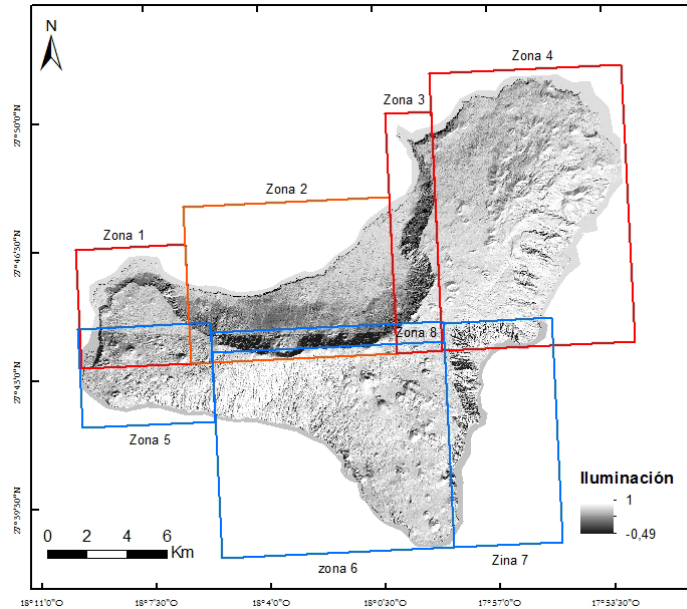


Figura 4.26. Zonas en las cuales se ha determinado c_k .

Los resultados para la imagen Norte (tabla 4.14) muestran como el coeficiente c_k , que es función de la iluminación, es mayor en todas las bandas excepto la 4 para la zona 3, que corresponde a la parte más oriental de El Golfo, debido a la orografía de esta zona con fuertes pendientes. En cambio, para la zona 4, que no presenta unas vertientes tan abruptas los valores son menores (excepto la banda 2 de la zona 2).

Tabla 4.14. Valores de la regresión lineal y del coeficiente c_k para la imagen Norte.

Bandas	Coef.	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4
1	b_k	0,012357	0,001719	0,013201	0,001702
	m_k	0,065603	0,053243	0,049736	0,061419
	c_k	0,188391	0,032286	0,265421	0,027711
2	b_k	0,011344	0,000093	0,009703	0,002492
	m_k	0,059060	0,050401	0,047295	0,060244
	c_k	0,192075	0,001845	0,205159	0,041365
3	b_k	0,011202	0,003427	0,008996	0,001507
	m_k	0,077175	0,057997	0,060094	0,077243
	c_k	0,145151	0,059089	0,149699	0,019510
4	b_k	0,042675	0,032364	0,027212	0,022956
	m_k	0,138725	0,165200	0,127528	0,175836
	c_k	0,307623	0,195908	0,213381	0,130553

En la imagen Sur ocurre lo mismo (tabla 4.15). En la zona 7, que corresponde a la costa desde Las Playas hasta La Restinga, la tipología de la topografía determina los valores más altos de c_k . En este caso, los contrastes son más acusados que en el norte. Los valores para esta zona son mayores que los obtenidos para la zona 3 en todas las bandas (desde un incremento del 89,7% -banda 4- al 215% -banda 3-).

Tabla 4.15. Valores de la regresión lineal y del coeficiente c_k para la imagen Sur.

Bandas	Coef.	Zona 5	Zona 6	Zona 7	Zona 8
1	b_k	0,007913	0,002668	0,042528	0,001996
	m_k	0,079857	0,058608	0,067371	0,040031
	c_k	0,099090	0,045523	0,631251	0,049861
2	b_k	0,005161	0,002389	0,033290	0,001641
	m_k	0,067850	0,056498	0,060177	0,038941
	c_k	0,076065	0,042285	0,553201	0,042141
3	b_k	0,006238	0,003170	0,036422	0,000988
	m_k	0,087488	0,077278	0,077236	0,037260
	c_k	0,071301	0,041021	0,471568	0,026516
4	b_k	0,010570	0,008513	0,058692	0,018815
	m_k	0,127644	0,185976	0,145008	0,224362
	c_k	0,082808	0,045775	0,404750	0,083860

Aplicando el método de corrección C se obtienen los valores de reflectividad. Los valores medios (tabla 4.16) son superiores a la banda del infrarrojo cercano y menores en las bandas del visible. Para la imagen Norte los valores mínimos corresponden a la zona 3, mientras que para la imagen Sur están en la zona 8 (excepto en el infrarrojo). Estas dos zonas forman los ejes estructurales NE-SO y NO-SE, siendo donde hay importantes pendientes. En el caso de los valores máximos se localizan en la zona 4 para la imagen Norte y en la zona 7 para la imagen Sur.

Tabla 4.16. Valores medios de reflectividad (Q_m) corregidos para la imagen Norte y Sur para el método de corrección C.

Bandas	Imagen	Zonas 1/5	Zonas 2/6	Zonas 3/7	Zonas 4/8
1	Norte	0,05909	0,03881	0,03531	0,05926
	Sur	0,06738	0,05375	0,07503	0,03075
2	Norte	0,04749	0,03695	0,03406	0,05280
	Sur	0,05273	0,04695	0,05718	0,02871
3	Norte	0,05339	0,03892	0,03795	0,06399
	Sur	0,06410	0,05959	0,06700	0,02890
4	Norte	0,09619	0,12420	0,10347	0,13424
	Sur	0,10042	0,12574	0,10966	0,15556

Comparando las bandas 4 y 3 (tabla 4.17) obtenemos una relación máxima en la Zona 8 que corresponde al eje NO-SE. A continuación, es la Zona 2 (El Golfo) la que presenta un alto valor. En cambio, la Zona 5 (sur de La Dehesa) presenta el menor valor. Esta gran diferencia entre el valor máximo y mínimo es debido al contraste orográfico entre las zonas.

Tabla 4.17. Relación entre las bandas 4 y 3 de los valores medios de reflectividad (Q_m) corregidos para la imagen Norte y Sur para el método de corrección C.

Imagen	Zona 1/5	Zona 2/6	Zona 3/7	Zona 4/8
Norte	1,80	3,19	2,73	2,10
Sur	1,57	2,11	1,64	5,38

La variación de la reflectividad mediante la corrección C para la imagen del Norte, es mayor en la banda 1 (4,9%) y menor en la banda 2 (2,1%), como se refleja en la figura 4.27 (A). En la imagen del Sur, son las bandas 4 y 1 las que muestran un mayor descenso (6,7% y 6%) y la banda 2 el menor (5,7%). En la figura 4.27 (B) está representada la variación de reflectividad en la zona 3, ya que es donde la pendiente es más pronunciada, el terreno es muy abrupto y hay más contrastes de los valores de iluminación, y aunque las diferencias no superan el 2%, las bandas 3 y 4 son las que presentan más diferencias (1,8% frente al 1,4%), lo cual asegura que no hay una subcorrección o sobrecorrección. Estas bandas son las más utilizadas para la determinación de los índices de vegetación, por eso la importancia de la corrección topográfica para la determinación de cubiertas vegetales. Se han obtenido valores algo más contrastados entre las bandas, sobre todo en zonas con menos variación en la iluminación, con un mayor efecto en la banda 4.

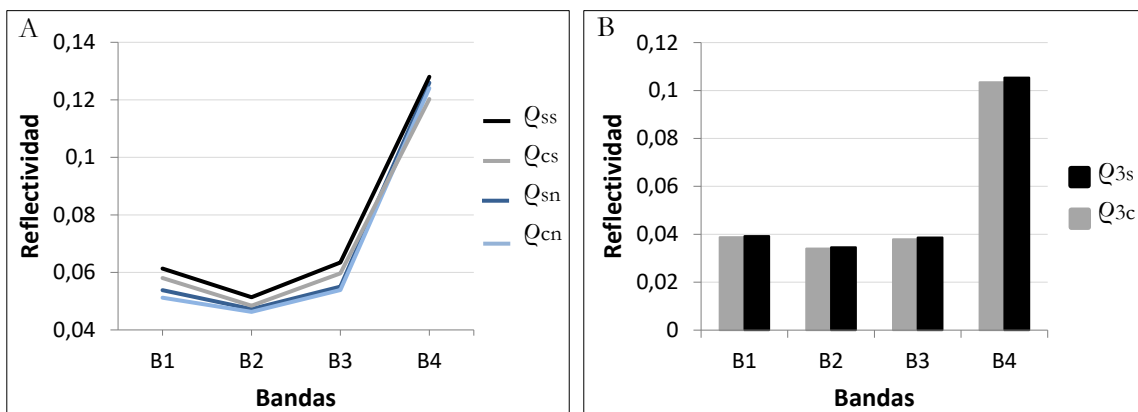


Figura 4.27. (A) Comparativa entre los valores de reflectividad antes (Q_{sn} , Q_{ss}) y después de aplicar la corrección C (Q_{cn} , Q_{cs}) para la imagen Norte y Sur. (B) Valores de reflectividad para la zona 3 antes (Q_{3s}) y después (Q_{3c}) de la corrección.

El método de corrección Empírico-Estadístico presenta unos valores mínimos de reflectividad media en la zona 3 para la imagen Norte y en la zona 8 para la imagen Sur

(excepto en el infrarrojo cercano) (tabla 4.18). La zona 4 tiene los valores medios más altos para la imagen Norte. En el caso de la imagen Sur, no presenta una zona característica de los valores superiores.

Tabla 4.18. Valores medios de reflectividad (Q_m) corregidos para la imagen Norte y Sur para el método Empírico-Estadístico.

Bandas	Imagen	Zonas 1/5	Zonas 2/6	Zonas 3/7	Zonas 4/8
1	Norte	0,05992	0,04768	0,03464	0,07245
	Sur	0,06950	0,06317	0,05968	0,03719
2	Norte	0,04224	0,04239	0,02998	0,05903
	Sur	0,05153	0,05092	0,03904	0,03415
3	Norte	0,04291	0,03847	0,03261	0,06989
	Sur	0,05899	0,05999	0,04660	0,03648
4	Norte	0,06011	0,11479	0,10534	0,11581
	Sur	0,09888	0,10663	0,07071	0,16638

La relación entre las bandas 4 y 3 (B_4/B_3) (tabla 4.19) presenta unos valores máximos en la Zona 8 que corresponde al eje NO-SE y en la Zona 3 (eje NE-SO). En ambas zonas es donde hay las mayores pendientes. La Zona 1 (norte de La Dehesa) muestra el menor valor.

Tabla 4.19. Relación entre las bandas 4 y 3 de los valores medios de reflectividad (Q_m) corregidos para la imagen Norte y Sur para el método Empírico-Estadístico.

Imagen	Zona 1/5	Zona 2/6	Zona 3/7	Zona 4/8
Norte	1,40	2,98	3,23	1,66
Sur	1,68	1,78	1,52	4,56

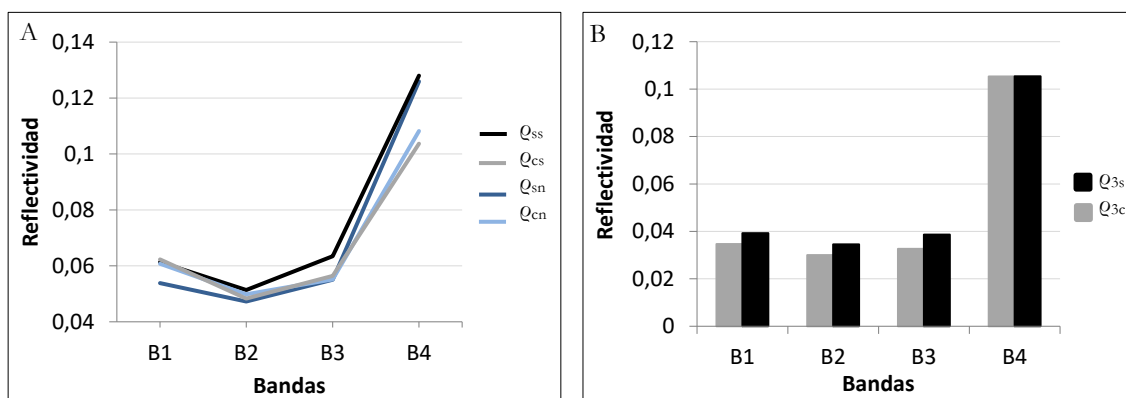


Figura 4.28. (A) Comparativa entre los valores de reflectividad antes (Q_{sn} , Q_{ss}) y después de aplicar la corrección Empírico-Estadística (Q_{cn} , Q_{cs}) para la imagen Norte y Sur. (B) Valores de reflectividad para la zona 3 antes (Q_{3s}) y después (Q_{3c}) de la corrección.

Para la corrección Empírico-Estadística se observa una disminución de la reflectividad en la banda 4 para ambas imágenes y en la banda 3 para la imagen del Sur (figura 4.28 A). Para la banda 1 hay un aumento tanto en la imagen Norte como en la Sur, y en la banda 2 disminuye en la imagen Sur y aumenta en la Norte. Por lo tanto, la banda del IRC es la que se ve más afectada por la corrección. Se ha comprobado en diferentes zonas los valores de la reflectividad, comprobando que en general homogeneiza el terreno reduciendo el efecto topográfico. En la figura 4.28 (B), se presentan unas condiciones muy extremas (zona 3) con fuertes pendientes y contrastes en la iluminación, se constata los efectos de la corrección en todas las bandas excepto en el IRC.

B) Validación.

Los resultados de la comparación visual de las imágenes corregidas topográficamente indican que se minimizan los efectos topográficos con los dos modelos utilizados a diferentes niveles. En la figura 4.29 se muestra una subescena de la imagen del norte que corresponde a Las Playas. Se ha realizado una composición de bandas 432 (IRC, rojo, verde). En esta zona los valores de la pendiente van de 0° a 87°, las elevaciones de 0 a 1.371 m y una menor iluminación está representada por zonas oscuras.

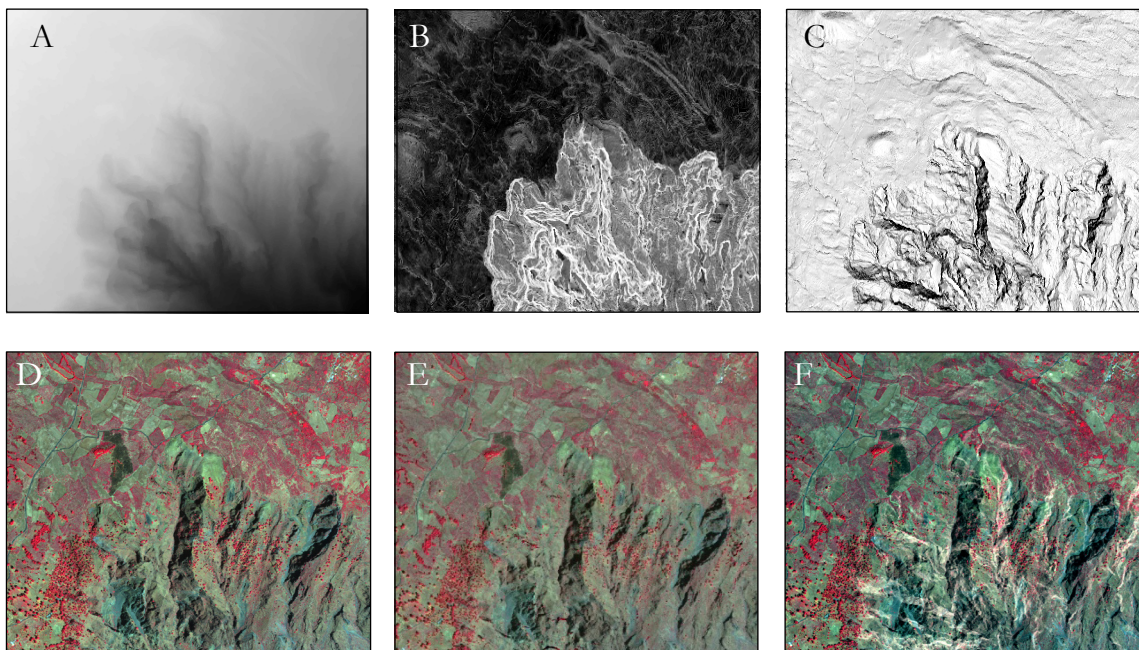


Figura 4.29. (A) MDE. (B) Pendientes. (C) Iluminación. (D) Composición 432 sin corrección topográfica, (E) después de aplicar el método de corrección C y (F) método Empírico-Estadístico.

Un análisis visual muestra que con la corrección C en las zonas con poca irradiancia solar hay una disminución de las sombras, aumentando la reflectividad, con respecto al método Empírico-Estadístico, confirmando los resultados de Meyer *et al.* (1993). En las laderas más

iluminadas el modelo C presenta un menor brillo, disminuyendo la reflectividad, en cambio el método Empírico-Estadístico muestra una sobrecorrección en las zonas con mayor relieve. En cuanto al efecto tridimensional del relieve, el análisis visual revela una ligera disminución en la corrección C.

Tabla 4.20. Desviación estándar para la imagen del Norte de la isla y para el Sur, aplicando correcciones topográficas y sin aplicar.

Banda	Norte			Sur		
	Sin corregir	Corrección C	Empírico-Estadístico	Sin corregir	Corrección C	Empírico-Estadístico
1	0,02796	0,02658	0,02899	0,03117	0,03013	0,03075
2	0,02431	0,02363	0,02471	0,02518	0,02405	0,02517
3	0,03439	0,03333	0,03470	0,03324	0,03130	0,03214
4	0,06438	0,06267	0,06371	0,07319	0,06865	0,07247

La desviación estándar indica que los dos métodos producen más homogeneidad en la imagen original (figura 4.30. y tabla 4.20).

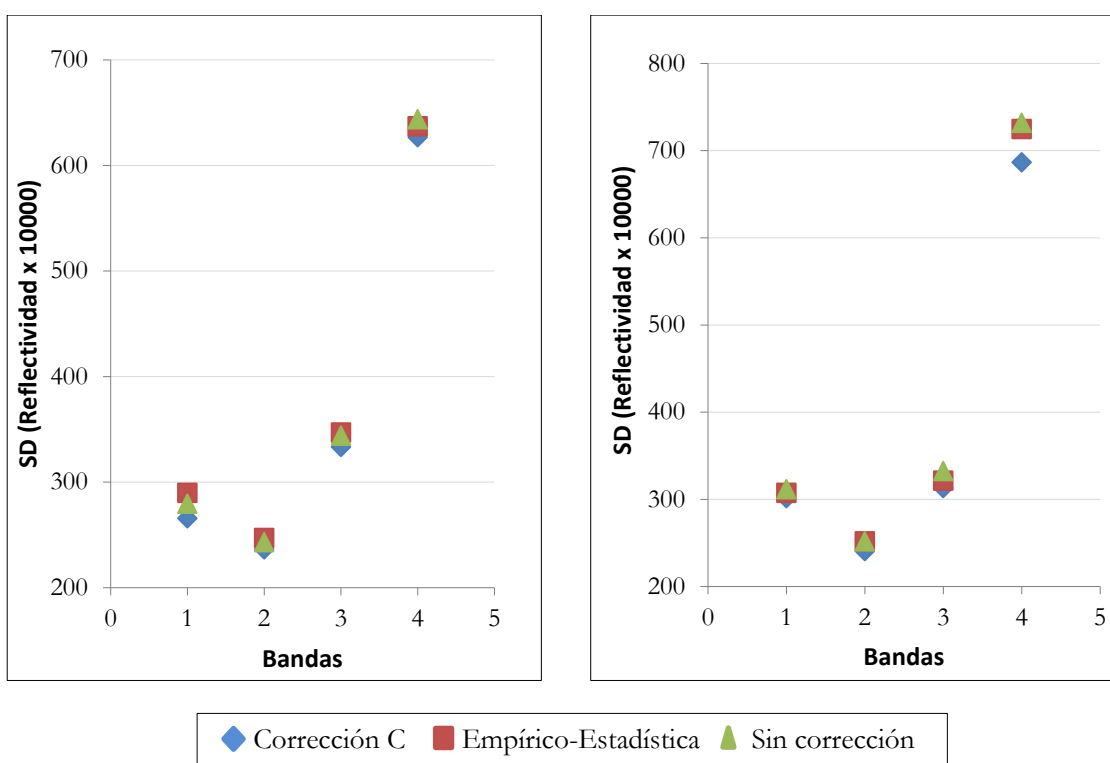


Figura 4.30. Desviación estándar para la imagen Norte (izquierda) con θ_i de 32,9° y Sur (derecha) con θ_i de 36,3°, con y sin corrección topográfica.

El método de corrección C presenta mejores resultados al disminuir la desviación estándar en mayor medida en todas las bandas (tabla 4.21). El método Empírico-Estadístico presenta problemas en las bandas 1, 2 y 3 de la imagen del Norte con un aumento de la desviación estándar.

Tabla 4.21. Desviación estándar en % en comparación con las imágenes sin corregir.

Banda	Norte		Sur	
	Corrección C	Empírico-Estadístico	Corrección C	Empírico-Estadístico
1	4,9	-3,7	3,3	1,3
2	2,8	-1,6	4,5	0,04
3	3,1	-0,07	5,8	3,3
4	2,7	1,0	6,2	1,0

En la tabla 4.22 se indican los valores del índice de dispersión. Un análisis de los valores muestra una disminución en el caso de la corrección C, lo que implica que corrige los efectos topográficos. Además, aumentan y decrecen en el mismo orden que la imagen sin corregir. No ocurre lo mismo con el método Empírico-Estadístico, ya que en general presenta valores mayores.

Tabla 4.22. Índices de dispersión en % para las diferentes bandas antes y después de las correcciones.

		B1	B2	B3	B4
Sin corregir	N	52	51,4	62,5	51,1
	S	50,8	49	52,4	57,2
Empírico-Estadístico	N	47,7	49,6	62,9	58,9
	S	49,3	52,1	56,9	69,9
Corrección C	N	51,9	51,1	61,9	50,5
	S	51,9	49,7	52,5	57,1

Los valores de RDMR se muestran en la figura 4.31. Las menores variaciones se producen con el método de corrección C, con los menores valores de RDMR tanto en la parte Norte como en la Sur. Las variabilidades máximas para la corrección C fueron en la banda 1 con un 4,8% y 4,1%, y para el modelo Empírico-Estadístico en la banda 2 de la parte Norte con un 71,8%.

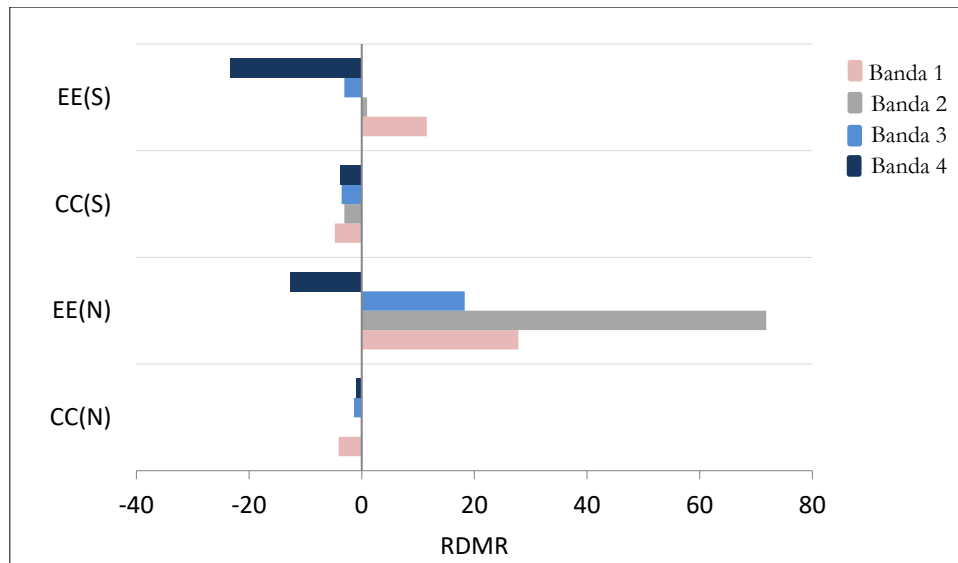


Figura 4.31. Estabilidad radiométrica a partir del RDMR después de la corrección topográfica. EE(S) es el método Empírico-Estadístico en la parte Sur, EE(N) en la parte Norte, SC(S) es el método de corrección C en la parte Sur y SC(N) en la parte Norte.

Se han representado los gráficos de dispersión de la reflectividad con el ángulo de iluminación antes y después de las correcciones (figura 4.32). Las correcciones topográficas presentan problemas para valores de iluminación bajos o negativos (Zhang *et al.*, 2011), con lo cual se han considerado valores superiores a 0,2. Como se puede ver, hay una disminución de la inclinación después de las correcciones y una reducción del coeficiente de correlación, lo que implica que se ha producido una disminución de los efectos topográficos. En la banda 4, el método de corrección C presenta una mayor corrección que el método Empírico-Estadístico, con un mayor grado de disminución de la pendiente en referencia a los valores de reflectividad antes de la corrección. También ocurre si comparamos los valores de la correlación. En la banda 3, vuelve a ser el modelo de corrección C el más efectivo, presentando menor pendiente y mayor reducción del coeficiente de correlación (3,1% en la imagen del norte y 5,8% en la del sur). En esta banda es donde menos eficiente se muestra el método Empírico-Estadístico.

Aunque los dos métodos presentan buenos resultados coincidiendo con otros autores como Soenen *et al.* (2005) y Baraldi *et al.* (2010), comparando los dos métodos el modelo de corrección C presenta una mejor corrección, con una reducción significativa de la pendiente y del coeficiente de correlación en ambas bandas.

El cálculo de la prueba *t* establece si el cambio de la corrección topográfica ha sido significativo, comparando las diferencias medias entre las reflectividades antes de la corrección topográfica y después de aplicar los métodos de corrección. Es significativo cuando *t* calculado es mayor al *t* crítico. A partir de una muestra de puntos de control

distribuidos de manera uniforme se ha determinado el valor p con un nivel de significación del 0,05 (tablas 4.23 y 4.24). Se ha obtenido el valor de t considerando varianzas separadas ya que el valor del grado de libertad (número de puntos de control) para cada método ha sido el mismo, siendo sus varianzas emparejadas.

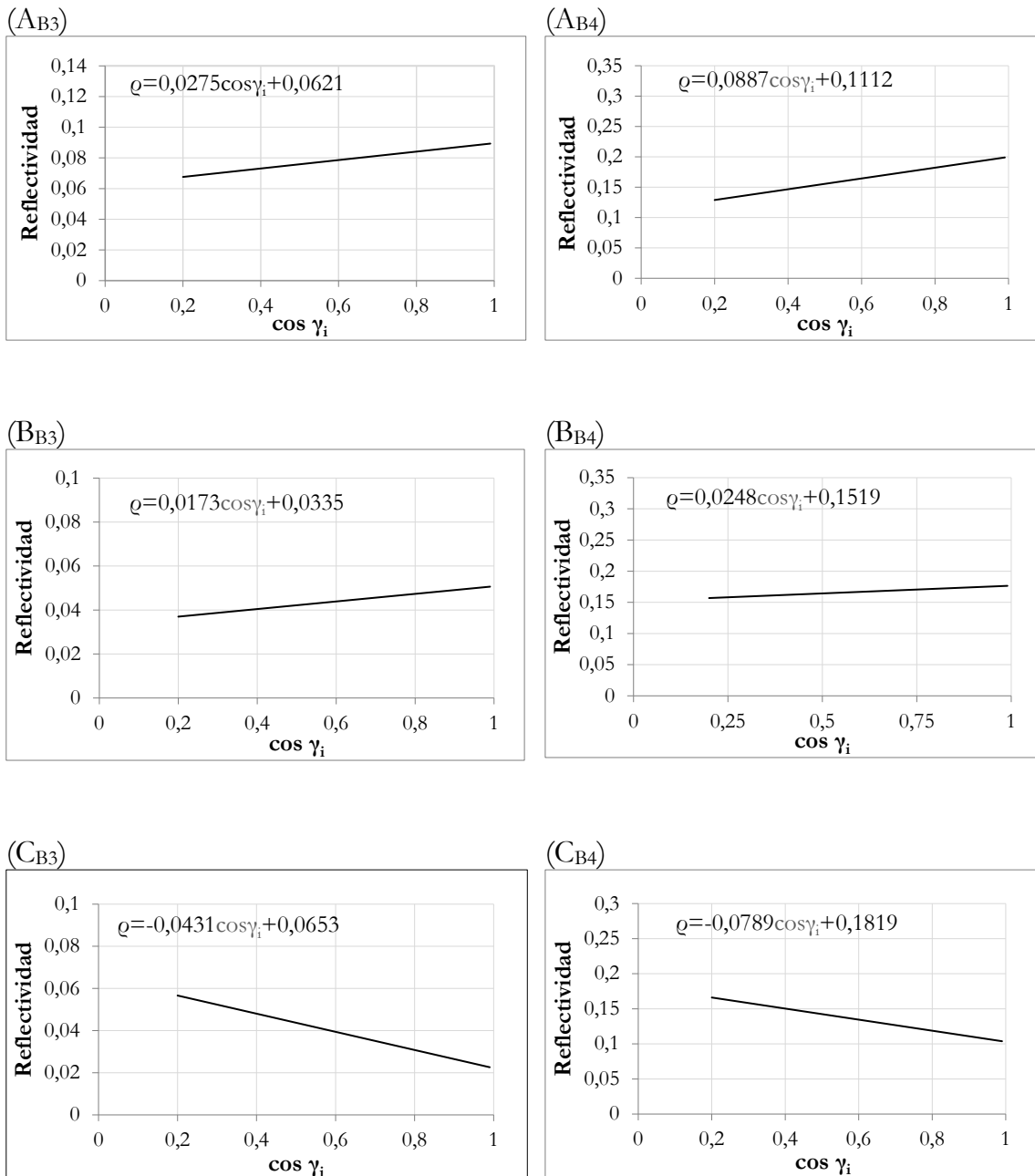


Figura 4.32. Relaciones lineales entre la reflectividad en las bandas 3 y 4, y la iluminación ($\cos \gamma_i$) antes y después de la corrección topográfica: (A_{B3}) y (A_{B4}) antes de la corrección, (B_{B3}) y (B_{B4}) con corrección C, (C_{B3}) y (C_{B4}) con corrección Empírico-Estadística.

Los dos métodos de corrección presentan efectos significativos en todas las bandas (excepto en la banda 1 de la imagen Sur para el método Empírico-Estadístico). Analizando las bandas 2, 3 y 4 (se ha desestimado la banda 1 por su baja influencia en la vegetación) ambos métodos producen una corrección topográfica. Los valores de la prueba t demuestran que el método Empírico-Estadístico produce sobrecorrección en la banda 4 de la imagen Norte y en las bandas 3 y 4 de la imagen Sur. Por lo tanto, el orden de importancia del método de corrección establecido por el valor de t , determina primero la corrección C.

Tabla 4.23. Medidas de evaluación de los dos métodos de corrección topográfica para la imagen Norte a partir de la prueba t . Reflectividades medias de los puntos de control antes y después de la corrección topográfica.

Banda	Sin corregir	Corrección C	Prueba t emparejada	p	Empírico-Estadístico	Prueba t emparejada	p
1	0,050323	0,047184	7,54	<0,001	0,056290	-7,18	<0,001
2	0,046370	0,045022	4,45	<0,001	0,048665	-3,20	<0,01
3	0,054684	0,053363	2,85	<0,01	0,052670	2,29	<0,05
4	0,139766	0,139766	2,47	<0,05	0,119379	9,05	<0,001

Tabla 4.24. Medidas de evaluación de los dos métodos de corrección topográfica para la imagen Sur a partir de la prueba t . Reflectividades medias de los puntos de control antes y después de la corrección topográfica.

Banda	Sin corregir	Corrección C	Prueba t emparejada	p	Empírico-Estadístico	Prueba t emparejada	p
1	0,062479	0,059205	4,07	<0,001	0,063766	-1,56	0,12
2	0,055093	0,051642	4,04	<0,001	0,052364	3,59	<0,001
3	0,068062	0,064412	4,07	<0,001	0,060650	7,74	<0,001
4	0,143008	0,131156	4,94	<0,001	0,116523	10,45	<0,001

En conclusión, comparando los dos métodos de corrección topográfica, el método de corrección C es el que homogeniza mejor los valores de reflectividad entre las zonas más y menos iluminadas, confirmando los resultados de Meyer *et al.* (1993), McDonald *et al.* (2000), Riaño *et al.* (2003), Gao y Zhang (2009), Hantson y Chuvieco (2011) y Sola *et al.* (2016). En este estudio se ha utilizado la corrección C para la corrección topográfica ya que la validación constata respecto al método Empírico-Estadístico, que:

- a) No produce sobrecorrección.
- b) Los valores de la SD son menores.
- c) Presenta mayor estabilidad radiométrica.
- d) Presenta mejores índices de dispersión.
- e) Los coeficientes de correlación son más constantes.

5. ÍNDICES DE VEGETACIÓN

Producen sus espesos y altos montes [...] lentiscos, barbusanos, palos blancos, viñátigos y tiles, hayas, brezos, acebuches, tabaibas y cardones...

*Antonio de Viana
(Antigüedades de las Islas Afortunadas).*

5.1. INTRODUCCIÓN.

La utilización de sensores en satélites ha experimentado un creciente desarrollo en las últimas décadas aportando datos cada vez con mayor resolución espacial. El hecho de que la reflectividad depende de la longitud de onda y la reflectividad espectral del tipo de material permite a la teledetección caracterizar los diferentes materiales. Unido a este auge tecnológico, la evolución de la informática, tanto en maquinaria como en software, ha hecho que la teledetección sea una importante herramienta geográfica para la determinación de las superficies vegetales y el estudio de los cambios en el tiempo, en concreto García *et al.* (2014) estudió la expansión del sabinar de *Juniperus phoenicea* subsp. *turbinata* en la Reserva Biológica de Doñana a partir de ortofotografías; Davies *et al.* (2010), investiga la cobertura de *Juniperus occidentalis* en *Juniperus mountain* (Idaho) mediante ortofotografías.

La radiancia recibida por el sensor está determinada por muchas variables, lo que dificulta la obtención de valores totalmente precisos del espectro de las superficies vegetales. Diversos estudios han utilizado las variables biofísicas y bioquímicas de la reflectividad de la hoja (Curran, 1980; Ross, 1981; Goel, 1988; Lusch, 1989; Jacquemoud y Baret, 1990; Myneni *et al.*, 1989, Myneni y Ross, 1991). Esto implica el estudio de diversos factores: 1) pigmentos (destacando la clorofila, la xantofila y el caroteno) con una fuerte absorción en determinadas zonas del espectro visible, 2) la estructura celular (mesófilo, parénquima, epidermis inferior y epidermis superior) con unos valores elevados de reflectividad en el infrarrojo cercano en las hojas sanas y 3) la humedad con valores menores de reflectividad en el infrarrojo medio en hojas sanas. Cabe destacar que entre las bandas espectrales del rojo (baja reflectividad) y del infrarrojo cercano (alta reflectividad) se produce un alto contraste en las cubiertas vegetales, aportando estas bandas un alto contenido de la información relativa a la vegetación. Otras variables dependen de la geometría (forma, área foliar, distribución espacial y angular, dosel vegetal, etc.), la reflectividad del suelo, la iluminación (radiación directa y difusa) y la geometría del sensor.

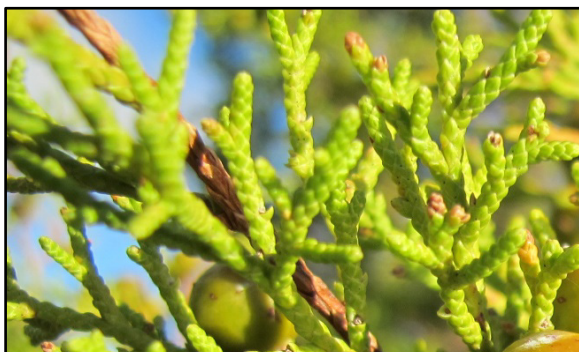


Figura 5.1. Ramas y hojas del *Juniperus turbinata*.

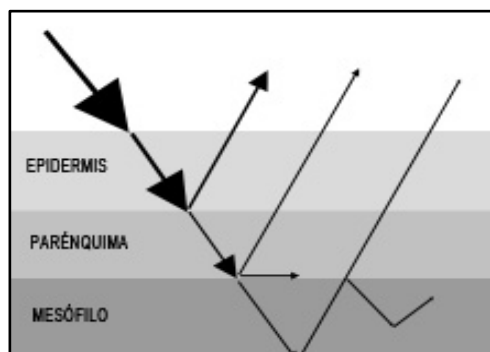


Figura 5.2. Interacción de la radiación en una hoja.

Como se observa en la figura 3.9 en la zona visible del rojo y el azul hay mínimos relativos, con un máximo relativo en la región del verde. Estos valores se producen por la absorción de luz azul y roja por la clorofila y otros pigmentos como la xantofila, el caroteno, y la antocianina (Gates *et al.*, 1965). Para poder realizar la fotosíntesis se necesita energía que proviene de la absorción de la luz roja y azul. En el IRC con valores próximos a $0,8 \mu\text{m}$, la reflectividad aumenta rápidamente y permanece en valores elevados hasta $1,35 \mu\text{m}$ debido a la estructura celular de la hoja, concretamente en el mesófilo de la hoja se produce la respiración de la planta por la transferencia de gases (Horler *et al.*, 1983). A partir de este valor el contenido de agua en la estructura interna de la hoja se refleja en la curva, destacando dos mínimos debido a la absorción del agua. Por lo tanto, las bandas del rojo y del infrarrojo cercano son las que proporcionan más información de la vegetación. La representación de estas dos bandas proporciona una imagen típica, observándose una relación lineal entre las dos bandas, denominada línea de suelo. Esta curva de reflectividad de la hoja (figura 3.9) también informa sobre vegetación sana o no, áreas con o sin vegetación y distinción entre especies. Para vegetación sana, los valores de reflectividad en la transición del rojo al IRC y el máximo relativo en el verde son más elevados respecto de la vegetación menos sana. Por eso en esta vegetación las hojas pierden su color verde al predominar los pigmentos diferentes a la clorofila.

La relación entre las medidas obtenidas por los sensores de los satélites y las variables biofísicas de la cobertura vegetal permite calcular los diversos índices de vegetación (IV), a partir de la combinación matemática de dos o más longitudes de onda. Por lo tanto, los cálculos de los índices de vegetación son a partir de la reflectividad de diferentes longitudes de onda. Esta relación de bandas origina nuevas bandas espectrales que caracterizan determinadas propiedades como por ejemplo el contenido de agua (Peñuelas *et al.*, 1997; Serrano *et al.*, 2000) o el contenido de clorofila (Ustin *et al.*, 1999). Se obtiene una imagen donde los parámetros de la cobertura vegetal están relacionados con los píxeles, ya que a partir de los valores de cada píxel se obtiene la reflectividad, a continuación, los índices de vegetación y finalmente la cobertura vegetal. Según Jackson *et al.* (1983), “*el índice ideal es particularmente sensible a la cubierta vegetal, insensible al brillo y color del suelo y poco afectado por la perturbación atmosférica, los factores medioambientales y las geométricas de la iluminación y de la observación*”. Los principales factores que afectan a los índices de vegetación son la reflectividad del suelo, la cantidad de vegetación y la geometría de la vegetación (ángulo de la hoja) (Rondeaux *et al.*, 1996; Haboudane *et al.*, 2004). El primer factor implica realizar una distinción precisa entre vegetación y suelo, ya que la fracción de hojas o vegetación en un píxel provocan cambios en el índice de vegetación. El segundo está relacionado con la cantidad de componentes bioquímicos y el tercero con factores estructurales. Hay un cuarto factor que añade Jones y Vaughan (2010), que son los cambios producidos en el rojo y en el IRC, como la variación en el ángulo de iluminación o en la fracción visible del área sombreada. Todos estos factores hacen que los índices de vegetación varíen a nivel espacial y estacional (Viña *et al.*, 2011).

A partir de las bandas IRC y del rojo se han generado los índices que únicamente utilizan

los valores de reflectividad de estas bandas, sin que intervenga ningún otro parámetro: SR¹, RVI², DVI³ y NDVI. Actualmente se han formulado numerosos índices de vegetación (Anexo B) y se han establecido diversas clasificaciones, de las que destacan las siguientes:

- Primera y segunda generación (Bannari *et al.*, 1995).
- Intrínsecos y los obtenidos por la línea de suelo⁴ (Rondeaux *et al.*, 1996).
- Baja y alta resolución espectral (Berk *et al.*, 1998; Gilabert *et al.*, 1997).
- Cociente entre bandas, combinaciones lineales de bandas e híbridos de estos dos.
- Ratio, ortogonales e híbridos (Broge y Leblanc, 2000).
- Simples, normalizados, multicanales e hiperespectrales (Jones y Vaughan, 2010).

Hay referencias de estudios ecológicos que combinan índices de vegetación como Soria *et al.* (2007) que combinan el NDVI y el SAVI y Fuentes *et al.* (2001) que utilizan los pigmentos y la absorción de agua para caracterizar bosques. A partir de imágenes de satélite, uno de los índices más utilizados para la cobertura vegetal es el NDVI (Carlson y Ripley, 1997, describen la dependencia entre el NDVI, el LAI y la cobertura de vegetación fraccional; Manrique, 1999, aplica el NDVI en imágenes SPOT y Landsat; Elmore *et al.*, 2000, utiliza imágenes Landsat; Hall *et al.*, 1998, a partir de MODIS; Schmidt y Karnieli, 2000, del NOAA; Cohen y Goward, 2004, del Landsat; Campo *et al.*, 2005, del Landsat; Petteorelli *et al.*, 2005, presenta una revisión del uso del NDVI; Iglesias *et al.*, 2010, utilizan imágenes del SPOT; Fernández *et al.*, 2010, del Landsat; Zeng *et al.*, 2013, del SPOT y Landsat; Vidal-Macua *et al.*, 2017, procesan series temporales del Landsat). Se han realizado estudios con imágenes de satélite para clasificar *Juniperus* con índices de vegetación (Peng *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2018; Poitras *et al.*, 2018), y en concreto para el *Juniperus phoenicea* (Elmahdy y Mohamed, 2016, utilizan imágenes Landsat 7 y 8 para determinar los parámetros que influyen en la mortalidad de *Juniperus phoenicea*, en concreto la altitud, la pendiente, la orientación, la curvatura, el drenaje, la intrusión de agua de mar y la cobertura del suelo, a partir del índice NDVI). Con alta resolución (Fadaei *et al.*, 2012, con ALOS para el *Juniperus excelsa*; Vatandaslar y Mehmet, 2017, con WorldView-2 para el *Juniperus communis*, *Juniperus excelsa*, *Juniperus foetidissima* y *Juniperus oxycedrus*; Garrity *et al.*, 2013, con QuickBird y WorldView-2 para el *Juniperus monosperma*; Laurin *et al.*, 2016, con ALOS2 para el *Juniperus occidentalis*). La resolución que presenta el GeoEye-1 permite considerar la homogeneidad de la cobertura vegetal a nivel de píxel para la obtención de los índices de vegetación en el sabinar, y en concreto para el *Juniperus turbinata*.

¹ Simple Ratio (Jordan, 1969).

² Ratio Vegetation Index: $RVI = \frac{Q_{IRC}}{Q_R}$ (Pearson y Miller, 1972).

³ Difference Vegetation Index: $DVI = Q_{IRC} - Q_R$ (Tucker, 1979).

⁴ Relación lineal entre las reflectividades del rojo y del IRC para un suelo determinado: $Q_{IRC} = \beta_1 \cdot Q_R + \beta_0$, donde β_1 es la pendiente de la línea de suelo y β_0 el término independiente (Richardson y Wiegand, 1977; Yoshioka *et al.*, 2010).

Después de un exhaustivo análisis de la literatura, y al no haberse utilizado índices de vegetación con imágenes de muy alta resolución para determinar la distribución del *Juniperus turbinata* en El Hierro, en este estudio a partir del GeoEye-1, se han utilizado nueve índices de vegetación con dicho propósito.

5.2. METODOLOGÍA.

En la figura 5.3 se muestra el proceso seguido para la determinación de los índices de vegetación y la elección del índice que mejor se ajusta a la distribución de *Juniperus turbinata*.

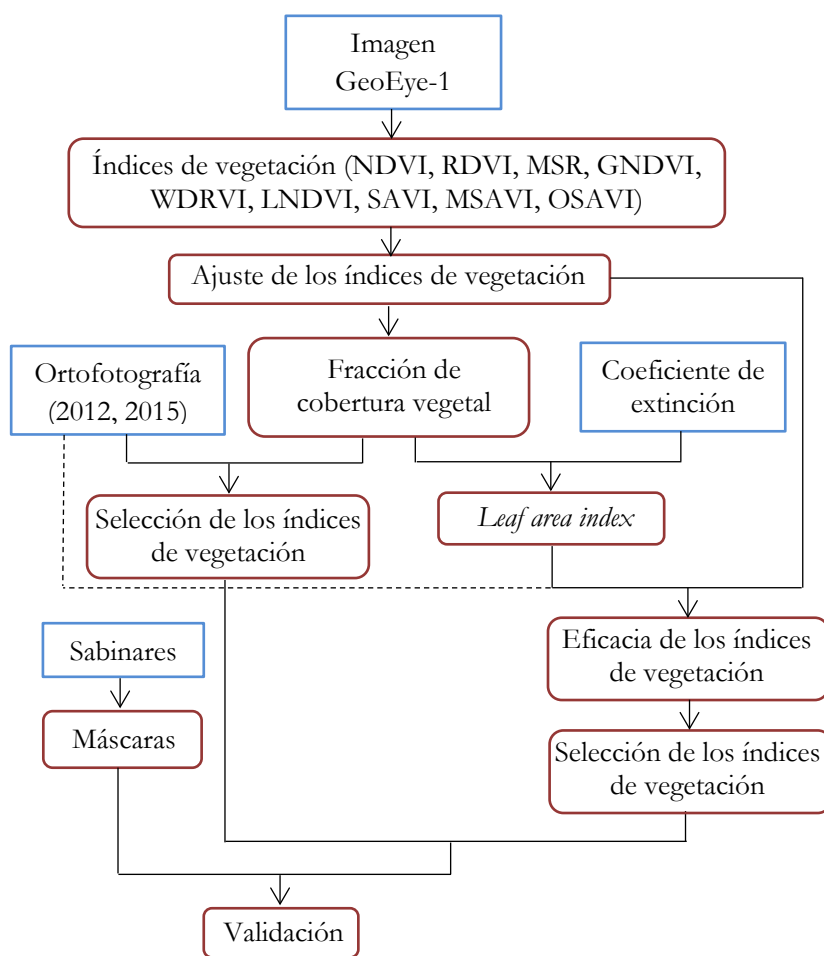


Figura 5.3. Esquema de la metodología para la localización de *Juniperus turbinata*.

5.2.1. CÁLCULO DE LOS ÍNDICES DE VEGETACIÓN.

Para el presente estudio se han seleccionado los siguientes índices de vegetación: NDVI,

RDVI, MSR, GNDVI, WDRVI, LNDVI, SAVI, MSAVI, OSAVI, todos ellos índices normalizados. Se han clasificado en dos grupos, el NDVI y los que derivan de este índice y el SAVI y los que se obtienen a partir de este índice. Dentro de cada grupo se ha seguido un orden cronológico. Se han calculado estos índices de vegetación porque se trabaja en el rango de las bandas y no se dispone de radiotelespectrómetro para obtener valores del espectro continuo de reflectividades.

5.2.1.1. *Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)*.

Propuesto por Rouse *et al.* (1973, 1974), es el índice más utilizado. Se obtiene a partir del contraste espectral del rojo y del IRC.

$$NDVI = \frac{\rho_{IRC} - \rho_R}{\rho_{IRC} + \rho_R}$$

siendo ρ_{IRC} la reflectividad en el IRC y ρ_R la reflectividad en el rojo.

Al dividir por $(\rho_{IRC} + \rho_R)$, que representa el promedio de la reflectividad en el rojo y el IRC, se reduce el efecto de tener una iluminación no uniforme. El índice varía entre -1 y 1, con valores próximos a cero para escasa vegetación y cerca de uno para alta densidad de vegetación sana. La presencia de nubes, nieve, agua, suelo desnudo y rocas proporciona valores negativos, ya que $\rho_R > \rho_{IRC}$. Cabe destacar la importancia de realizar la corrección atmosférica ya que el valor del NDVI puede variar hasta en un 70% (Cracknell, 1997).

La obtención de este índice aporta información sobre la cantidad de clorofila (Curran, 1989), agua (Hardy y Burgan, 1999), dióxido de carbono (Hall *et al.*, 1991), radiación para la fotosíntesis (Myneni *et al.*, 1989; Sellers *et al.*, 1992), vegetación (Steven y Jaggard, 1995), *leaf area index* (LAI) (Curran, 1983), lluvia recibida (Taylor *et al.*, 1985), evapotranspiración (Cihlar *et al.*, 1991), la biomasa (Tucker *et al.*, 1985), la producción primaria neta (Prince, 1991) y efectos del fuego (Hammill y Bradstock, 2006). Este índice presenta ciertas desventajas, ya que está influenciado por las partículas atmosféricas y el suelo (Huete *et al.*, 1985; Kaufman y Tanré, 1992; Carlson y Ripley, 1997) y presenta saturación a valores altos del *leaf area index* (Carlson y Ripley, 1997; Gitelson *et al.*, 2007). Esto último es debido a que el NDVI es insensible para valores de reflectividad en el IRC si la reflectividad en el rojo es mucho menor a la reflectividad en el IRC, ya que la ecuación tiende a 1, siendo prácticamente invariante a los valores de la reflectividad en el IRC (Gitelson, 2004).

5.2.1.2. *Renormalized Difference Vegetation Index (RDVI)*.

Este índice pretende combinar las ventajas de los índices DVI y NDVI, según Roujean y Breon (1995):

$$RDVI = (DVI \cdot NDVI)^{1/2} = \frac{(\rho_{IRC} + \rho_R)^{1/2}}{\rho_{IRC} - \rho_R}$$

siendo ρ_{IRC} la reflectividad en el IRC y ρ_R la reflectividad en el rojo.

La superficie del suelo afecta de manera importante al índice NDVI y de manera más notable con baja densidad de vegetación. En cambio, la superficie del suelo afecta menos al índice DVI, especialmente para valores bajos del LAI, pero más a las propiedades espectrales y direccionales. Este índice recoge las ventajas del NDVI y del DVI. Para valores del LAI superiores a 3 este índice presenta una buena sensibilidad y poca afectación por la concentración de clorofila. Para valores superiores a 3, donde mayor problema presentan los índices de vegetación, muestra un aceptable comportamiento.

5.2.1.3. *Modified Simple Ratio (MSR)*.

Chen (1996a) propuso este índice como mejora del RDVI. Pretende obtener una mejor linealidad respecto a diferentes valores biofísicos. Este índice, respecto al NDVI, es menos sensible a los cambios de las propiedades ópticas y geométricas de la cubierta vegetal y de la geometría de la observación.

$$MSR = RDVI / \rho_R^{0.5} = \frac{\frac{\rho_{IRC}}{\rho_R} - 1}{\left(\frac{\rho_{IRC}}{\rho_R} + 1\right)^{1/2}}$$

siendo ρ_{IRC} la reflectividad en el IRC y ρ_R la reflectividad en el rojo.

5.2.1.4. *Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI)*.

Este índice establece una relación entre la banda del IRC y la del verde. Propuesto por Gitelson *et al.* (1996), se determinó a partir de encontrar el rango de mayor sensibilidad para la clorofila. La franja de verde para el GeoEye-1 está entre 520 y 600 nm y por lo tanto la máxima concentración de clorofila. Los objetivos de este índice son que sea sensible a los efectos atmosféricos (los autores del índice utilizan la presencia de clorofila para valores inferiores a 520 nm y a 670 nm -hojas amarillo verdoso a verde oscuro-, siendo una corrección la diferencia de radiancia entre el azul y el rojo) y que sea constante a los componentes que no sean clorofila (utilizando rangos donde la reflectividad se vea influenciada de manera significativa por la clorofila y no por otros pigmentos, siendo en el rango 520-630 nm y cerca de 700 nm).

$$GNDVI = \frac{\rho_{IRC} - \rho_G}{\rho_{IRC} + \rho_G}$$

siendo ρ_{IRC} la reflectividad en el IRC y ρ_G la reflectividad en el verde.

Ya que establece un rango mayor de detección de la clorofila que el índice NDVI es más sensible a concentraciones de este pigmento y en principio mejor para valores altos del LAI a partir de 3.

También se puede establecer para determinar estados fisiológicos de la vegetación ya que para la vegetación sana el máximo de sensibilidad de reflectividad corresponde a la máxima absorción de clorofila, mientras que para vegetación enferma ese valor de reflectividad no es sensible a la clorofila (Gitelson *et al.*, 1996).

5.2.1.5. *Wide Dynamic Range Vegetation Index (WDRVI)*.

Este índice propuesto por Gitelson (2004) pretende corregir la poca sensibilidad del NDVI para densidades altas de vegetación. Para ello introduce un coeficiente que disminuya la diferencia entre los valores de la reflectividad en el IRC y en el rojo. Con ello se consigue que para valores de ρ_{IRC} mucho mayores que de ρ_R (que son los que provocan la saturación del NDVI) la relación de la ecuación no sea la unidad.

$$WDRVI = \frac{a \cdot \rho_{IRC} - \rho_R}{a \cdot \rho_{IRC} + \rho_R}$$

donde el coeficiente de ponderación a tiene un valor de 0,05 a 0,2.

Los resultados obtenidos por Gitelson (2004) sobre cultivos de trigo, soja y maíz fueron un aumento de la sensibilidad de este índice para valores del LAI entre 2 y 6, triplicó la sensibilidad en comparación con el NDVI. Con ello se puede definir de manera más precisa las propiedades fisiológicas y fenológicas de la vegetación.

5.2.1.6. *Linearization of Normalized Difference Vegetation Index (LNDVI)*.

Para establecer una linealidad entre el NDVI y la fracción de cobertura vegetal y minimizar el problema de la saturación del NDVI en zonas con mucha vegetación, Jiang *et al.* en 2010 proponen este índice.

$$LNDVI = 1,2 \cdot \frac{\rho_{IRC} - \rho_R}{\rho_{IRC} + 5 \cdot \rho_R}$$

siendo ρ_{IRC} la reflectividad en el IRC y ρ_R la reflectividad en el rojo.

Cuando la reflectividad en el rojo es nula, el valor del NDVI es 1, mientras que el LNDVI es 1,2, con lo que presenta mayor valor. Para valores inferiores de NDVI, ambos índices presentan similar sensibilidad a la vegetación. La relación del LNDVI y el NDVI con la reflectividad del IRC es más lineal en el caso del LNDVI, en cambio con la reflectividad del rojo es menor. Esto implica que el LNDVI no presenta la saturación para áreas con alta densidad de vegetación (Gitelson, 2004), siendo más efectivo que el NDVI con respecto a la fracción de cobertura vegetal y el *leaf area index*. Esta mejora de la linealidad del NDVI permite obtener con mayor precisión las zonas con vegetación y la especificación de vegetación.

5.2.1.7. Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI).

Huete (1988) propuso un índice para minimizar las influencias del brillo del suelo. El índice SAVI minimiza la influencia del suelo en la reflectividad, ayudando a disociar la respuesta espectral del suelo y de la vegetación en cubiertas discontinuas (Huete, 1988; Baret y Guyot, 1991; Elvidge y Chen, 1995; Gilabert *et al.*, 2002; Serra y Pons 2013). El índice implica a las bandas del IRC y del rojo.

$$SAVI = \frac{\rho_{IRC} - \rho_R}{\rho_{IRC} + \rho_R + L} \cdot (1 + L)$$

siendo ρ_{IRC} la reflectividad en el IRC, ρ_R la reflectividad en el rojo y L constante en función del tipo de suelo puede variar de 0 a $+\infty$ aunque Huete (1988) lo limita para cubiertas vegetales con poca densidad a un valor óptimo de 1, para densidades intermedias el valor de L a 0,5 y para altas densidades a 0,25.

La determinación de esta constante es el principal inconveniente de este índice. La introducción de la constante en el denominador viene del cambio en el origen de la representación de las reflectividades del IRC y del rojo. En la figura 5.4 se representan las isolíneas de vegetación según el índice NDVI y el PVI. Se observa un diferente

comportamiento espectral de un píxel de vegetación cuando se humedece el suelo para el NDVI (convergiendo al origen según una isolínea) y el PVI (siguiendo una isolínea paralela a la línea de suelo). Las isolíneas convergen a valores negativos originando un cambio de coordenadas con origen en E (l_1, l_2), a diferencia del PVI que son paralelas a la línea de suelo o del NDVI que convergen en el origen. La introducción del factor (1+L) es para mantener el mismo rango que el NDVI, de -1 a 1. Con ello, se tienen en cuenta las interacciones tierra-vegetación de primer orden y la extinción diferencial del flujo rojo e IRC a través de los doseles con vegetación.

En comparación con el NDVI, el SAVI reduce las variaciones del suelo, diferencia mejor los tipos de vegetación y mejora la linealidad entre este índice y el LAI. En general se obtienen valores más elevados para el NDVI en suelos más oscuros (Gilabert *et al.*, 2002).

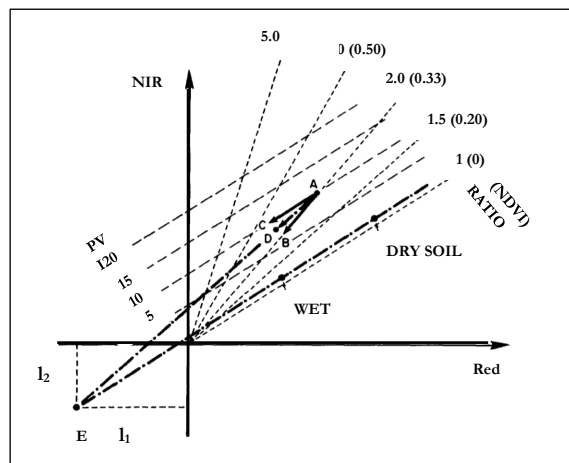


Figura 5.4. Isolíneas de vegetación en función de la banda del IRC y del rojo para los índices NDVI y PVI. El punto A representa una cubierta sobre suelo seco, el punto B el comportamiento espectral cuando se humedece la cubierta según el índice NDVI y el punto C según el índice PVI. Fuente: Huete, 1988.

5.2.1.8. Modified Soil Adjusted Vegetation Index (MSAVI).

Este índice, propuesto por Qi *et al.* (1994), modifica el SAVI variando la constante L por una función que es inversamente proporcional a la cantidad de vegetación, por lo que no son necesarios parámetros del suelo ya que sus efectos son en función de las diferentes densidades de coberturas. Para obtener la constante L en el SAVI es necesario conocer el *leaf area index*, y para conocer el *leaf area index* se requiere el índice de vegetación (Wu *et al.*, 2007). La función puede obtenerse de forma empírica:

$$L = 1 - 2 \cdot \gamma \cdot NDVI \cdot WDVI$$

donde γ es la pendiente de la línea de suelo y el factor 2 aumenta el rango dinámico de L, o mediante un método inductivo:

$$L_1 = 1 - MSAVI_0$$

donde $MSAVI_0$ utiliza $L_0(0, +/- \infty)$. Es decir, a partir de:

$$MSAVI = \frac{\rho_{IRC} - \rho_R}{\rho_{IRC} + \rho_R + L} \cdot (1 + L)$$

se obtiene,

$$MSAVI_0 = \frac{\rho_{IRC} - \rho_R}{\rho_{IRC} + \rho_R + L_0} \cdot (1 + L_0)$$

$$MSAVI_1 = \frac{\rho_{IRC} - \rho_R}{\rho_{IRC} + \rho_R + 1 - MSAVI_0} \cdot (2 - MSAVI_0)$$

e iterando la función n veces:

$$MSAVI = \frac{2 \cdot \rho_{IRC} + 1 - [(2 \cdot \rho_{IRC} + 1)^2 - 8 \cdot (\rho_{IRC} - \rho_R)]^{0,5}}{2}$$

siendo ρ_{IRC} la reflectividad en el IRC, ρ_R la reflectividad en el rojo.

El MSAVI, que varía de -1 a 1, minimiza el efecto del suelo desnudo y aumenta el rango de los valores de vegetación. Todo ello hace que aumente la sensibilidad a la vegetación.

5.2.1.9. Optimization Soil Adjusted Vegetation Index (OSAVI).

Rondeaux *et al.* (1996) proponen una variación para el índice SAVI:

$$OSAVI = \frac{\rho_{IRC} - \rho_R}{\rho_{IRC} + \rho_R + X}$$

siendo ρ_{IRC} la reflectividad en el IRC, ρ_R la reflectividad en el rojo y X un factor que minimiza sobre el índice de vegetación el efecto del suelo. Según los autores de este índice, el valor 0,16 es el que mejor se ajusta tanto a poca como a mucha densidad de vegetación. El rango del índice varía de 0 a 1. Para el cálculo de este índice no es necesario disponer de datos previos de los parámetros que determinan la línea de suelo. La variación de los valores debidos al suelo se distribuyen uniformemente en todo el rango del índice.

5.2.2. AJUSTES DE LOS ÍNDICES DE VEGETACIÓN.

Como se ha mencionado anteriormente, el factor que influye en mayor grado en los índices de vegetación es la interacción entre la vegetación y el suelo. Para reducir el ruido del suelo sobre la cobertura vegetal, el valor mínimo que presenta cada índice de vegetación se contrasta con la ortofotografía, comprobando si pertenece a vegetación o a suelo. El ajuste

se realiza reclasificando el valor mínimo. De esta forma quedan modificados los índices de vegetación a las características propias de El Hierro.

5.2.3. COMPARATIVA ENTRE ÍNDICES DE VEGETACIÓN (IV).

Se han utilizado dos parámetros biofísicos, el índice de área foliar y la fracción de cobertura vegetal. Con ello, se pretende obtener el índice de vegetación que mejor describa la cobertura vegetal. Se han calculado estos parámetros biofísicos para el sabinar seco en el noroeste de El Hierro y se han seleccionado los índices de vegetación que proporcionan un mejor ajuste. A continuación, se han seleccionado 100 puntos de control a partir de la ortofotografía correspondientes a *Juniperus turbinata* de La Dehesa y de Sabinosa (figura 5.5) y se ha obtenido el índice de área foliar de los índices de vegetación. Para el cálculo de la fracción de cobertura vegetal se han seleccionado 50 puntos de control. Finalmente, para determinar la eficiencia de los índices de vegetación se ha obtenido el coeficiente C de Leprieur, el *Range Error Ratio*, el *Noise Equivalent* y el *p* valor.

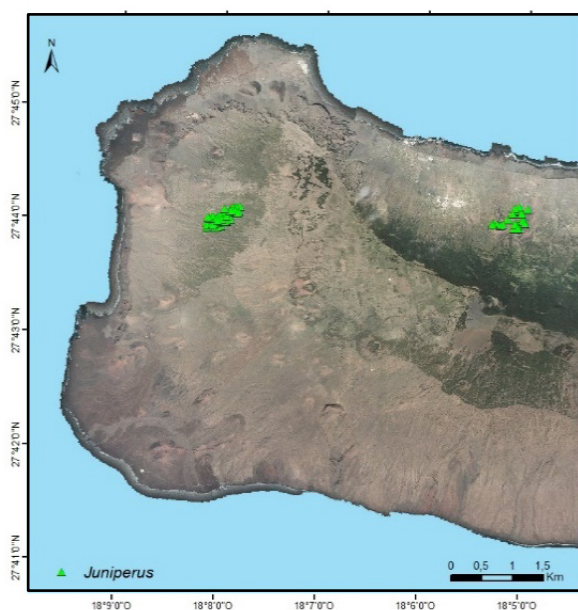


Figura 5.5. Localización de *Juniperus turbinata* de control para la obtención del LAI.

5.2.3.1. Fracción de cobertura vegetal (f_c).

La fracción de cobertura vegetal es un parámetro biofísico que se define como “el porcentaje de la proyección vertical del área de vegetación verde respecto del área estadística total” (Wang *et al.*, 2017). Las relaciones entre la cubierta vegetal, la atmósfera y la hidrología están influenciadas por este parámetro (Yan *et al.*, 2012). Diversos estudios con imágenes de satélite de alta resolución han utilizado este indicador para validar resultados (Fillol *et al.*,

2006). Podemos establecer una relación aproximada entre la fracción de cobertura vegetal y los índices de vegetación, considerando que están relacionados de forma lineal (Choudhury *et al.*, 1994; Wittich y Hansing, 1995; Yang *et al.*, 2013):

$$f_c = (IV - IV_{suelo}) / (IV_{veg} - IV_{suelo})$$

donde IV_{suelo} es el índice para el suelo puro e IV_{veg} es el índice para vegetación pura.

La relación lineal es de la forma:

$$f_c = b \cdot IV + a$$

siendo $b = 1 / (IV_{veg} - IV_{suelo})$ y $a = -IV_{suelo} / (IV_{veg} - IV_{suelo})$.

Hay que tener en cuenta que el valor mínimo de los índices de vegetación puede ser negativo, por lo que se ha de comprobar que no corresponda a agua. La validación de los resultados de la fracción de cobertura vegetal a partir de imágenes de satélite frente a los que se puedan obtener *in situ* ha demostrado tener una gran consistencia (Yang *et al.*, 2012).

5.2.3.2. Leaf area index (LAI).

El *leaf area index* (LAI) mide la densidad de hojas. Las hojas influyen en muchos procesos fisiológicos vegetales como la fotosíntesis, la transpiración y el intercambio de CO₂ (Nemani *et al.*, 1993; Reichstein *et al.*, 2003, Cowling y Field, 2003). Este índice permite determinar la absorción y la transmitancia de la radiación por el dosel vegetal. Por lo tanto, para estudios de ecosistemas vegetales es de gran importancia su cálculo (Jarvis y Leverenz, 1983; Asner *et al.*, 2003; Le Maire *et al.*, 2008), sobre todo en la obtención del balance energético de la cubierta y para la fotosíntesis. Su aplicación no ha estado limitada por las escalas espaciales y se ha obtenido a nivel continental, regional como local (Running y Coughlan, 1988; Bonan, 1993; Sellers *et al.*, 1997). A partir de la teledetección se puede obtener de una manera efectiva los valores del LAI (Liang *et al.*, 2012). Cuando el LAI aumenta la reflectividad en la banda del infrarrojo aumenta, pero disminuye en la banda del rojo. En cambio, cuando disminuye, la reflectividad tiende a la del suelo puro.

Para la determinación del LAI se han utilizado los índices de vegetación. El comportamiento espectral de las hojas (Roberts *et al.*, 2004) y la estructura del bosque en El Hierro, ha condicionado la utilización de aproximaciones en el cálculo. La orientación, la forma y la naturaleza de las hojas, influye en la radiación reflejada, absorbida y transmitida (figura 5.6).

Además, la heterogeneidad de la masa forestal hace que determinadas especies influyan en mayor medida en el LAI (Soudani *et al.*, 2003). En el cálculo del LAI a partir del índice de

vegetación hay que considerar tres aspectos que determinan su eficiencia: la estabilidad del índice de vegetación, la sensibilidad del índice de vegetación a cambios del LAI y el rango de valores de reflectividad del índice de vegetación (Wu *et al.*, 2007). El modelo utilizado para obtener la relación entre el LAI y el índice de vegetación parte de la ley de Beer-Lambert.



Figura 5.6. (Izquierda) Interacciones de la radiación en función de la orientación de la hoja. Fuente: Jones y Vaughan, 2010. (Derecha) Hojas del *Juniperus turbinata*.

La ley de Beer-Lambert relaciona la absorción de la luz con las propiedades del material y su expresión es:

$$I_x = I_0 \cdot e^{(-k \cdot x)}$$

donde I_x es la densidad del flujo radiante en cualquier nivel, I_0 la densidad de flujo radiante en la superficie, k el coeficiente de extinción y x la longitud de la trayectoria.

Considerando que la fracción de cobertura vegetal (f_c) depende del LAI, del ángulo de la hoja y del ángulo de incidencia de la radiación, podemos relacionar la fracción de cobertura vegetal y el LAI:

$$f_c = 1 - e^{-k \cdot LAI}$$

Por lo tanto,

$$LAI = -\ln(1 - f_c) / k$$

Como se explica en el apartado 5.2.3.1., para la fracción de cobertura vegetal se utilizará la ecuación:

$$f_c = (IV - IV_{suelo}) / (IV_{veg} - IV_{suelo})$$

quedando la relación entre el LAI y los IV de la siguiente forma:

$$LAI = -\ln[1 - (IV - IV_{suelo}) / (IV_{veg} - IV_{suelo})] / k$$

El coeficiente de extinción depende de la orientación de las hojas y del ángulo cenital (Θ) (Jones, 1992) y significa el aumento del índice de vegetación por un aumento en el LAI (Broge y Leblanc, 2000). Para el *Juniperus turbinata* se ha elegido una distribución del ángulo de la hoja aleatoria:

$$k = 1 / (2 \cdot \cos\Theta)$$

Por lo tanto, el algoritmo utilizado ha sido el siguiente:

$$LAI = 2 \cdot \cos\Theta \cdot \{-\ln[1 - (IV - IV_{suelo}) / (IV_{veg} - IV_{suelo})]\} = 2 \cdot \cos\Theta \cdot [-\ln(1-f)]$$

que es equivalente a:

$$IV = IV_{veg} - (IV_{veg} - IV_{suelo}) \cdot e^{-k \cdot LAI}$$

$$IV = a - b \cdot e^{-k \cdot LAI}$$

presentando el valor máximo (IV_{veg}), es decir, el valor de saturación, cuando el LAI es infinito.

5.2.3.3. Raíz del error cuadrático medio (RMSE).

Los valores obtenidos de los índices de vegetación se han validado para garantizar la calidad de una manera cuantitativa. Para ello, de la ortofotografía se seleccionan 100 puntos de control correspondientes a *Juniperus turbinata* de La Dehesa y de Sabinosa (figura 5.5). A continuación, se han comparado los valores de la fracción de cobertura vegetal y de los índices de vegetación en los puntos de control. El mismo procedimiento se ha seguido para el LAI.

La raíz del error cuadrático medio (RMSE, *root mean square error*) informa sobre la precisión del ajuste de la ecuación utilizada para el cálculo del LAI y de la f_c . El RMSE para los puntos de sabinosa se obtiene de la función de ajuste entre el índice de vegetación y el LAI (Viña *et al.*, 2011) o el f_c . Su ecuación es la siguiente:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{i=n} (x_i - y_i)^2}{n}}$$

siendo n el número de puntos y x_i e y_i valores del índice de vegetación vs. el LAI o la f_c .

5.2.3.4. Eficacia de los índices de vegetación.

Para determinar la eficacia de los diferentes índices de vegetación, y por lo tanto el grado de ruido entre el índice de vegetación y el LAI o f_c , se han utilizado tres modelos. El primero consiste en calcular el coeficiente C (Leprieur *et al.*, 1994):

$$C = \frac{\int_{\varphi_{\min}}^{\varphi_{\max}} [IV(\varphi)_{\max} - IV(\varphi)_{\min}] \cdot d(\sigma)}{IV(\varphi)_{\max} - IV(\varphi)_{\min}}$$

siendo φ_{\max} y φ_{\min} la fracción de vegetación máxima y mínima, $IV(\varphi)_{\max}$ e $IV(\varphi)_{\min}$ el valor máximo y mínimo del índice de vegetación para el intervalo $(\varphi_{\max}, \varphi_{\min})$ e $\overline{IV(\varphi)_{\max}}$ e $\overline{IV(\varphi)_{\min}}$ los valores medios.

Este coeficiente está afectado por las variaciones espectrales del índice de vegetación en el rango del LAI para el que el índice de vegetación es válido (Gilabert *et al.*, 2002). La relación de eficacia de un índice de vegetación es inversamente proporcional a C, es decir, los valores mayores de C indican menor eficacia. Hay que tener en cuenta que este método no considera la sensibilidad al cambio de unidad del LAI o de la f_c .

En el segundo método se determina el *Range Error Ratio* (RER). En este caso la relación de eficacia es directa, siendo los valores más altos los representativos de un mejor índice de vegetación.

$$RER = \frac{\xi_{\max} - \xi_{\min}}{RMSE}$$

donde ξ_{\max} y ξ_{\min} son los valores máximos y mínimos del LAI para los diferentes índices de vegetación. La eficacia es directamente proporcional al valor del RER. Este método también se ha aplicado a la f_c .

El tercer método, *Noise Equivalent* (NE), establece el grado de sensibilidad de los diferentes índices de vegetación para detectar cambios en el LAI (Viña y Gitelson, 2005).

$$NE = \frac{RMSE_{LAI}}{d(IV)/d(LAI)}$$

siendo $d(IV)/d(LAI)$ la derivada de la función de regresión entre los índices de vegetación y el LAI, $RMSE_{LAI}$ es el error cuadrático medio entre la relación índice de vegetación y LAI

(Govaerts *et al.*, 1999). La mejor sensibilidad de los índices de vegetación es inversamente proporcional a los valores de NE.

Como las funciones de relación entre el índice de vegetación y el LAI han sido exponenciales y lineales, el NE es de la siguiente forma:

$$NE = \frac{RMSE_{LAI}}{d(a \cdot b \cdot e^{k \cdot LAI}) / d(LAI)} = (RMSE_{LAI}) / (k \cdot b \cdot e^{k \cdot LAI})$$

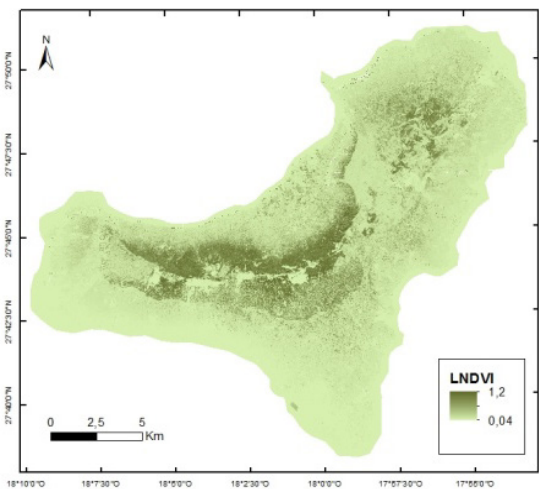
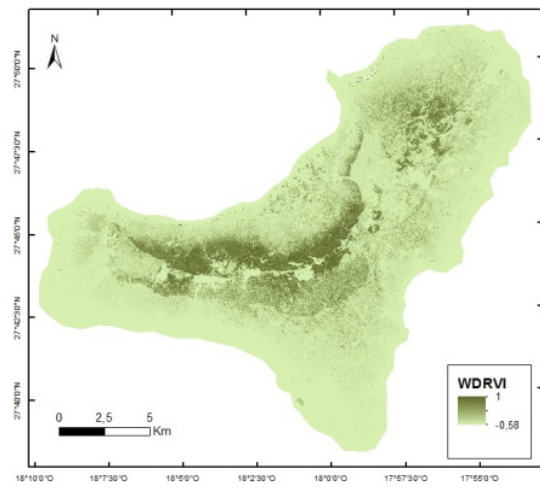
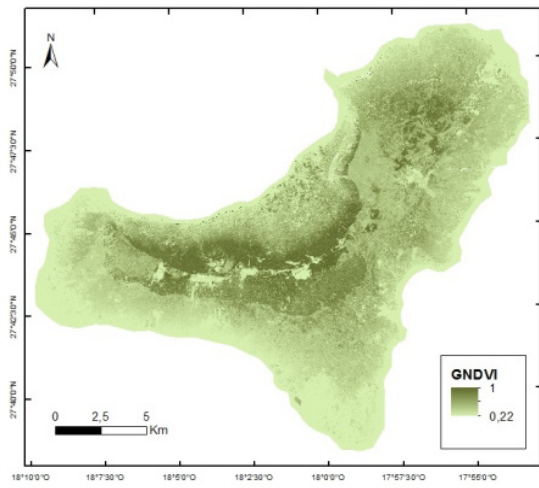
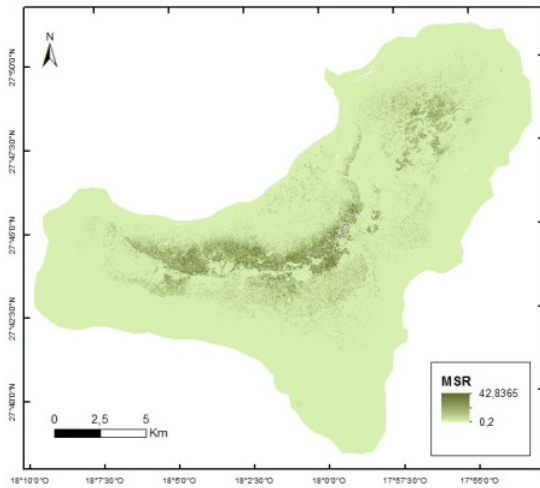
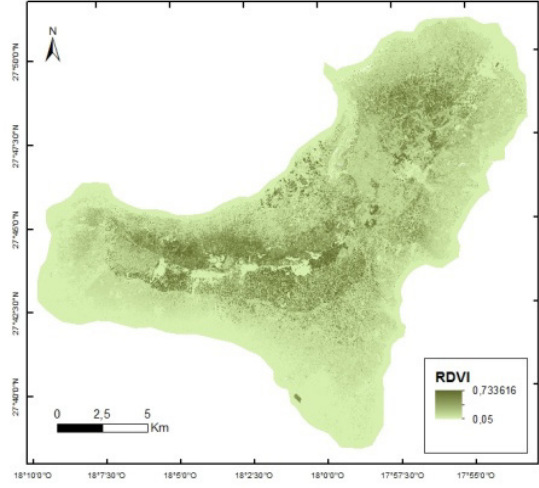
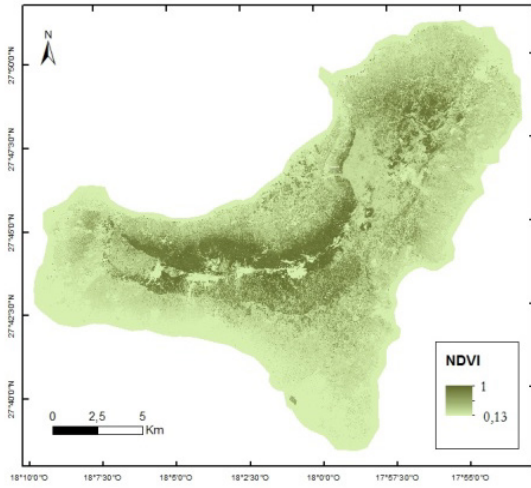
$$NE = \frac{RMSE_{LAI}}{d(a + b \cdot LAI) / d(LAI)} = RMSE_{LAI} / b$$

Con este modelo se expresa una mayor sensibilidad al LAI de los diferentes índices de vegetación para menores valores de NE (Viña y Gitelson, 2005). Este modelo también se ha aplicado a la f_c , utilizando una relación lineal.

5.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

5.3.1. ÍNDICES DE VEGETACIÓN.

En la figura 5.7 se indica la distribución de la cubierta vegetal en función del índice de vegetación. Los índices OSAVI y RDVI son los que presentan menor rango de reflectividades, en cambio, el MSR y el MSAVI muestran una mayor homogeneidad. En todos los casos los valores máximos corresponden a la vertiente norte del eje NO-SE, que es donde los valores de humedad y pendiente son mayores. Los contrastes más grandes se observan en los índices WDRVI, LNDVI y MSR. En las cotas más bajas todos los índices presentan los valores más bajos de reflectividad siendo el WDRVI y el MSR los que muestran un mayor porcentaje de píxeles.



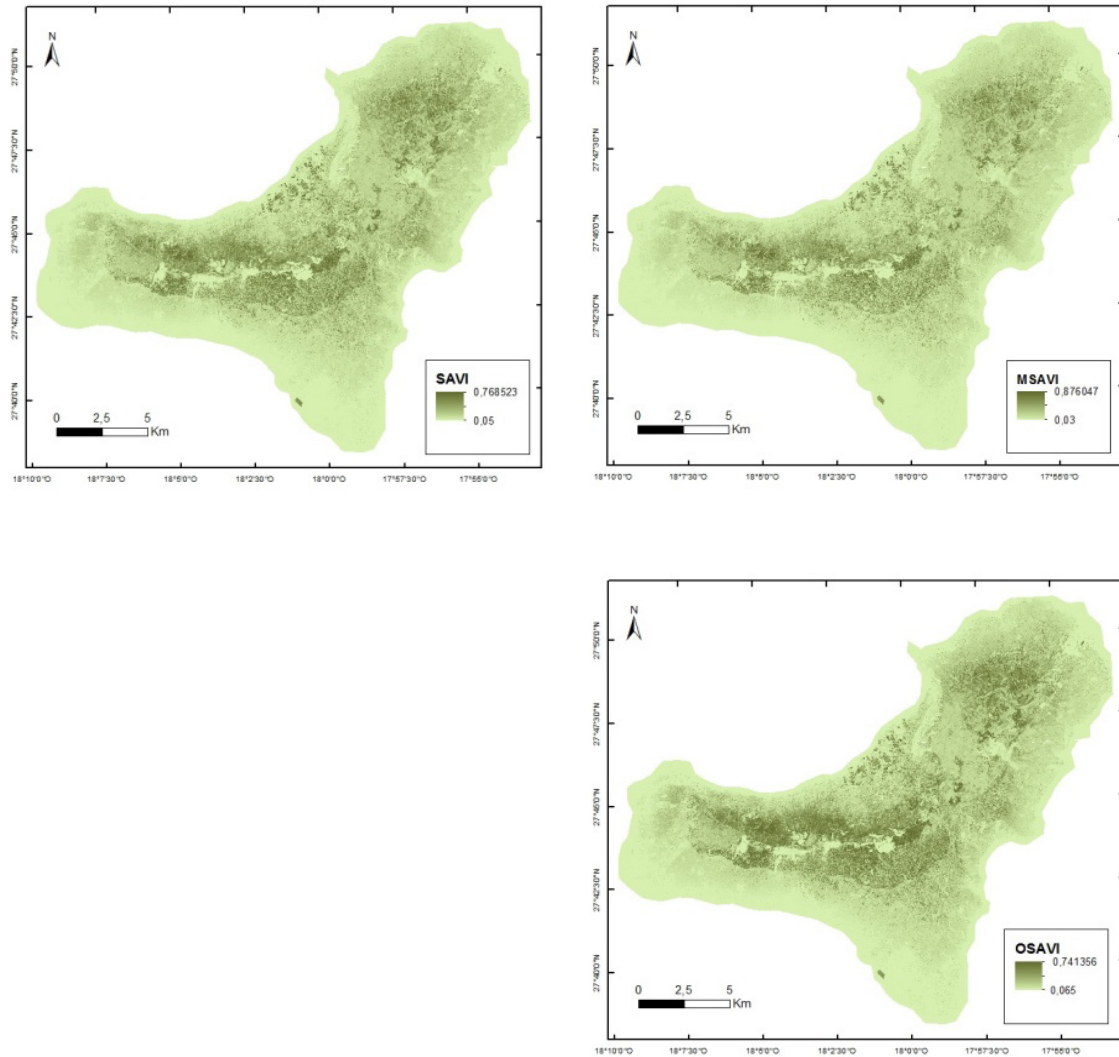


Figura 5.7. Índices de vegetación en El Hierro.

El índice MSAVI es el que presenta menor desviación estándar (figura 5.8) lo que representa menos heterogeneidad en los valores del índice de vegetación, en cambio los índices WDRVI y MSR tienen los valores más altos lo que implica una mayor diferencia entre valores extremos como se refleja en el análisis visual de las imágenes (figura 5.7). Referente al valor medio el índice MSAVI es el que presenta menor diferencia con respecto al valor mínimo y el GNDVI respecto al valor máximo.

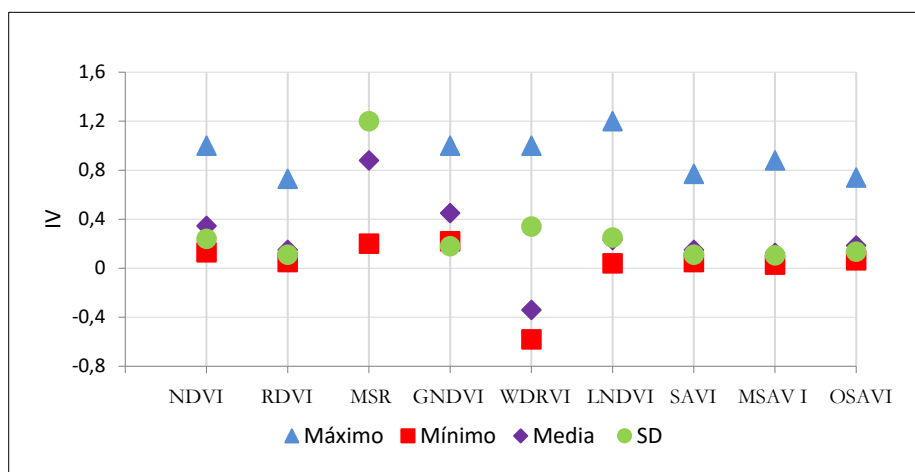


Figura 5.8. Valores máximos, mínimos, media y desviación estándar para los diferentes índices de vegetación.

5.3.2. AJUSTES DE LOS ÍNDICES DE VEGETACIÓN.

En la tabla 5.1 se muestran los valores de ajuste para los diferentes índices de vegetación. El ajuste se ha realizado en los valores mínimos ya que son los que pueden mostrar la interacción entre la vegetación y el suelo. Con ello se ha reducido el ruido del suelo, siendo el NDVI y el GNDVI, los que presentan una mayor diferencia, asignando píxeles correspondientes de suelo a cubierta vegetal.

Tabla 5.1. Valores máximos y mínimos de reflectividad para los diferentes índices de vegetación en la imagen Norte y Sur, antes del ajuste (Mín₁ N, Mín₁ S) y después (Mín₂ N, Mín₂ S).

	NDVI	RDVI	MSR	GNDVI	WDRVI	LNDVI	SAVI	MSAVI	OSAVI
Mín ₁ N	-1	-0,4603	-1	-1	-1	-0,21	-0,4881	-0,4065	-0,5477
Mín ₂ N	0,13	0,05	0,2	0,22	-0,55	0,04	0,05	0,03	0,075
Mín ₁ S	-1	-0,3394	-1	-1	-1	-0,24	-0,3335	-0,3329	-0,4186
Mín ₂ S	0,13	0,05	0,2	0,22	-0,58	0,05	0,05	0,04	0,065
Máx N	1	0,7265	38,08	1	1	1,2	0,7675	0,876	0,7414
Máx S	1	0,7336	42,84	1	1	1,2	0,7675	0,8532	0,7316

5.3.3. FRACCIÓN DE COBERTURA VEGETAL (f_c).

Los valores de los índices de vegetación del sabinar del noroeste de la isla para suelo puro y vegetación pura corresponden a los máximos y mínimos expresados en la tabla 5.2. Los valores máximos y mínimos de la fracción de cobertura vegetal en todos los índices son 1 y 0 respectivamente. El MSR y el MSAVI son los índices que presentan un mayor grado de homogeneidad según los valores de la desviación estándar, con una menor variabilidad espacial de fracción de cobertura vegetal, lo que supone una mayor precisión. Los índices

NDVI y el GNDVI presentan un nivel de error de sensibilidad relativamente alto con respecto a los otros índices.

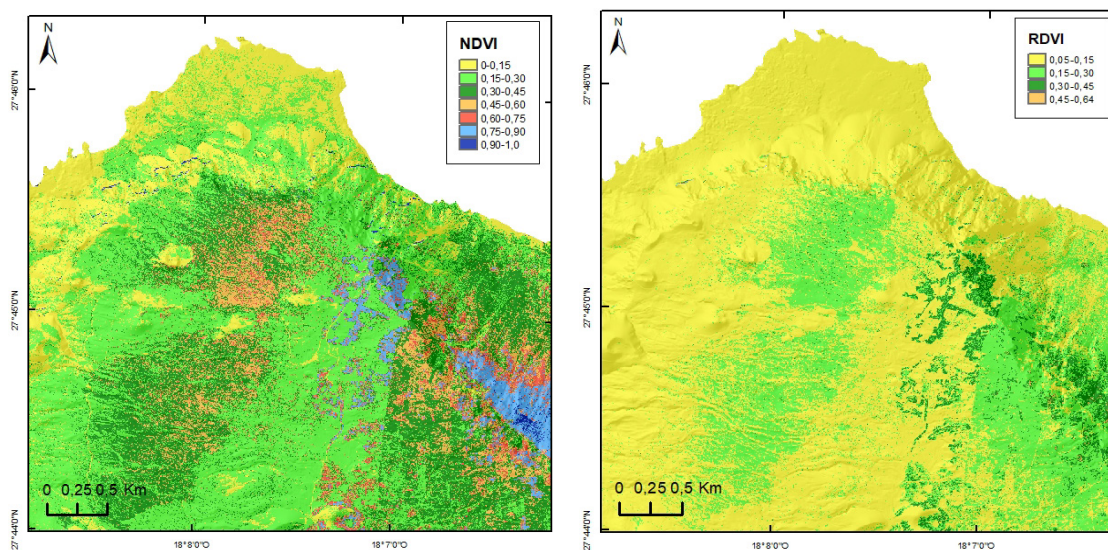
Tabla 5.2. Parámetros estadísticos referidos a la regresión lineal $IV=a+b \cdot fc$ en el noroeste de la isla. $IV_{m\acute{a}x}$ e $IV_{m\acute{i}n}$ son los valores para suelo y vegetación puros. SD es la desviación estándar.

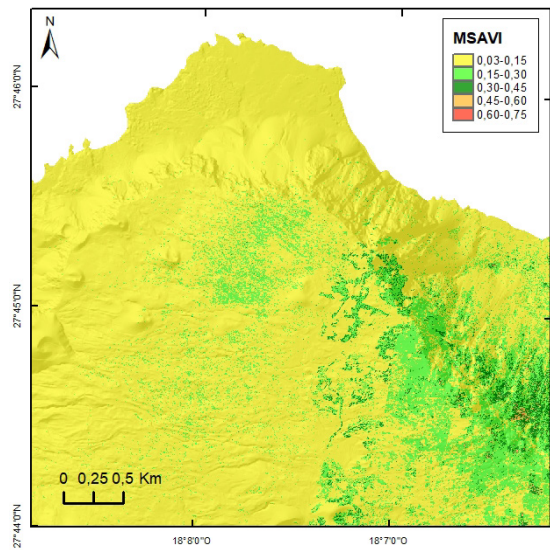
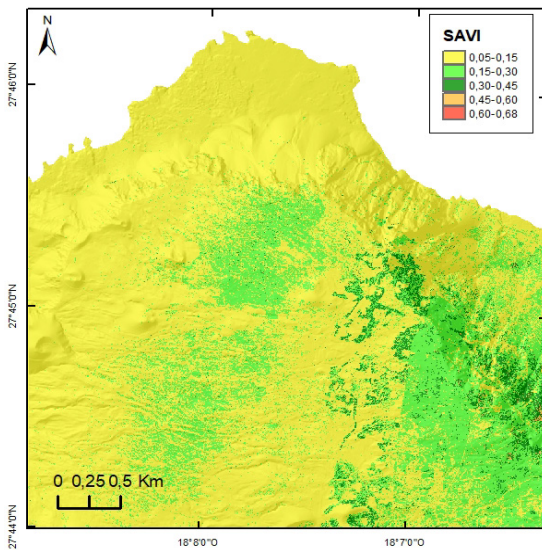
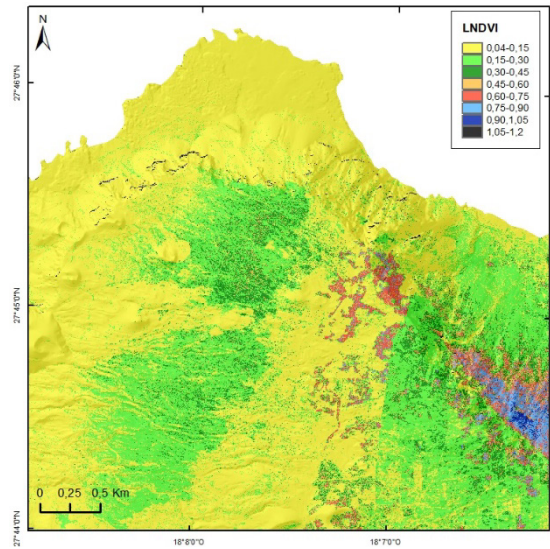
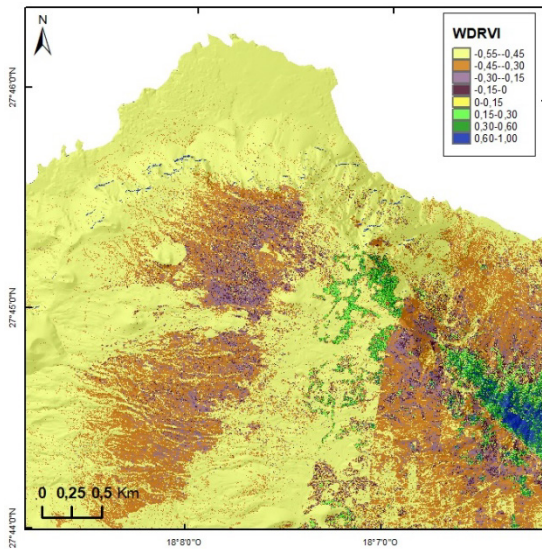
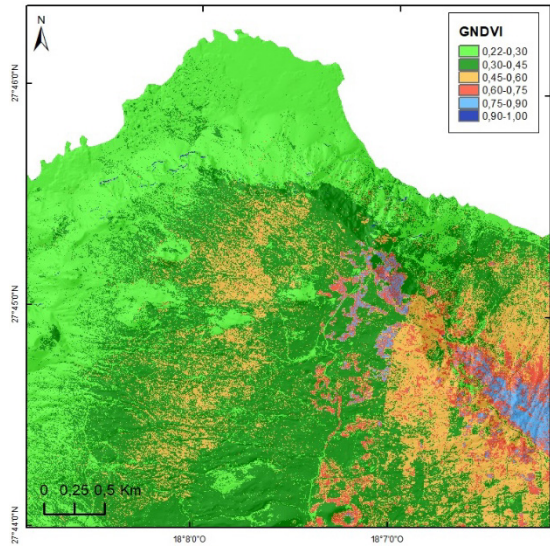
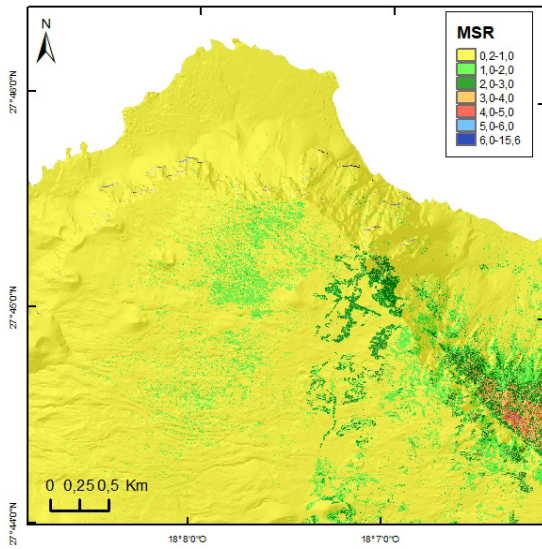
	NDVI	RDVI	MSR	GNDVI	WDRVI	LNDVI	SAVI	MSAVI	OSAVI
$IV_{m\acute{a}x}$	1	0,6420	15,5933	1	1	1,2	0,6808	0,7537	0,6850
$IV_{m\acute{i}n}$	0,13	0,05	0,2	0,22	-0,55	0,04	0,05	0,03	0,075
Mean	0,19	0,13	0,02	0,18	0,08	0,11	0,11	0,09	0,14
SD	0,20	0,13	0,04	0,18	0,13	0,13	0,12	0,10	0,15
a	0,1311	0,0481	0,218	0,218	-0,552	0,0388	0,0486	0,0311	0,084
b	0,8662	0,5938	15,359	0,785	1,5511	1,1663	0,6388	0,7225	0,5961

La relación que se ha establecido entre los índices de vegetación y la fracción de cobertura vegetal es lineal (tabla 5.2).

El MSR y el WDRVI son los que presentan una mayor sensibilidad frente a cambios de la fracción de cobertura vegetal en contraposición al RDVI y OSAVI. En la figura 5.9 se representa la distribución espacial de los diferentes valores de la fracción de cobertura vegetal.

Para el máximo de fracción de cobertura vegetal el índice MSR es el que presenta el máximo de reflectividad. Los índices que presentan altos valores de reflectividades son el LNDVI, NDVI, GNDVI y WDRVI, mientras que el RDVI, SAVI, OSAVI y MSAVI muestran los valores más bajos.





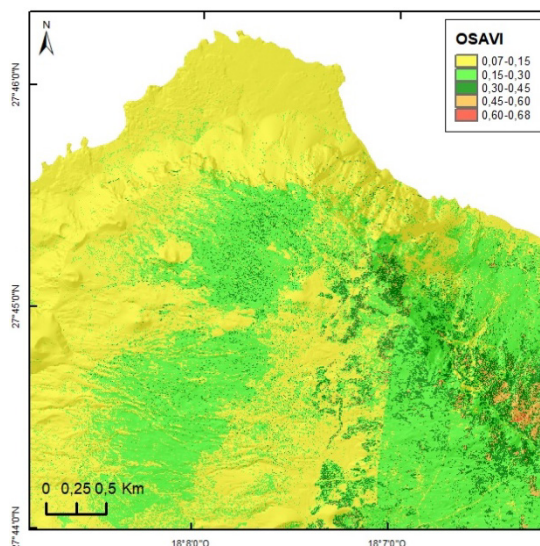


Figura 5.9. Valores de la fracción de cobertura vegetal para los índices de vegetación en el noroeste de El Hierro.

La relación índice de vegetación- f_c en la zona de control del sabinar (figura 5.10) establece una mayor sensibilidad para el MSR y el WDRVI, produciendo más variabilidad de la fracción de cobertura vegetal para incrementos del índice de vegetación. Se observa que el RDVI presenta el valor de pendiente más bajo, con incrementos más pequeños frente a los cambios de la f_c . Esta baja respuesta de los valores del índice frente a fluctuaciones de la fracción de cobertura vegetal implica una menor eficacia. La distribución de los valores de cobertura vegetal es más homogénea en el GNDVI, RDVI y MSAVI, en cambio el MSR es el índice que presenta una mejor tendencia.

Los valores máximos y mínimos de la fracción de cobertura vegetal en los puntos seleccionados del sabinar en La Dehesa y en Sabinosa se muestran en la tabla 5.3. El ajuste se ha hecho mediante una regresión lineal (figura 5.11). Los índices que presentan un menor rango de reflectividad son el MSR y el MSAVI. El índice MSR muestra los menores valores de fracción de cobertura vegetal tanto para el valor máximo del rango como para el mínimo.

Tabla 5.3. Valores máximos y mínimos de fracción de cobertura vegetal para los diferentes índices de vegetación en sabinar: a y b son los parámetros de la función $IV=a+b \cdot f_c$.

	NDVI	RDVI	MSR	GNDVI	WDRVI	LNDVI	SAVI	MSAVI	OSAVI
Máximo	0,57	0,35	0,074	0,44	0,26	0,33	0,28	0,21	0,36
Mínimo	0,33	0,21	0,037	0,21	0,13	0,17	0,10	0,13	0,18
a	0,1405	0,0574	0,206	0,2244	-0,5358	0,0444	0,0543	0,0189	0,0785
b	0,8454	0,5568	15,305	0,7665	1,4918	1,152	0,6076	0,787	0,6012
RMSE	0,0743	0,0627	--	0,1488	0,4441	0,0849	0,0332	0,0181	0,0430

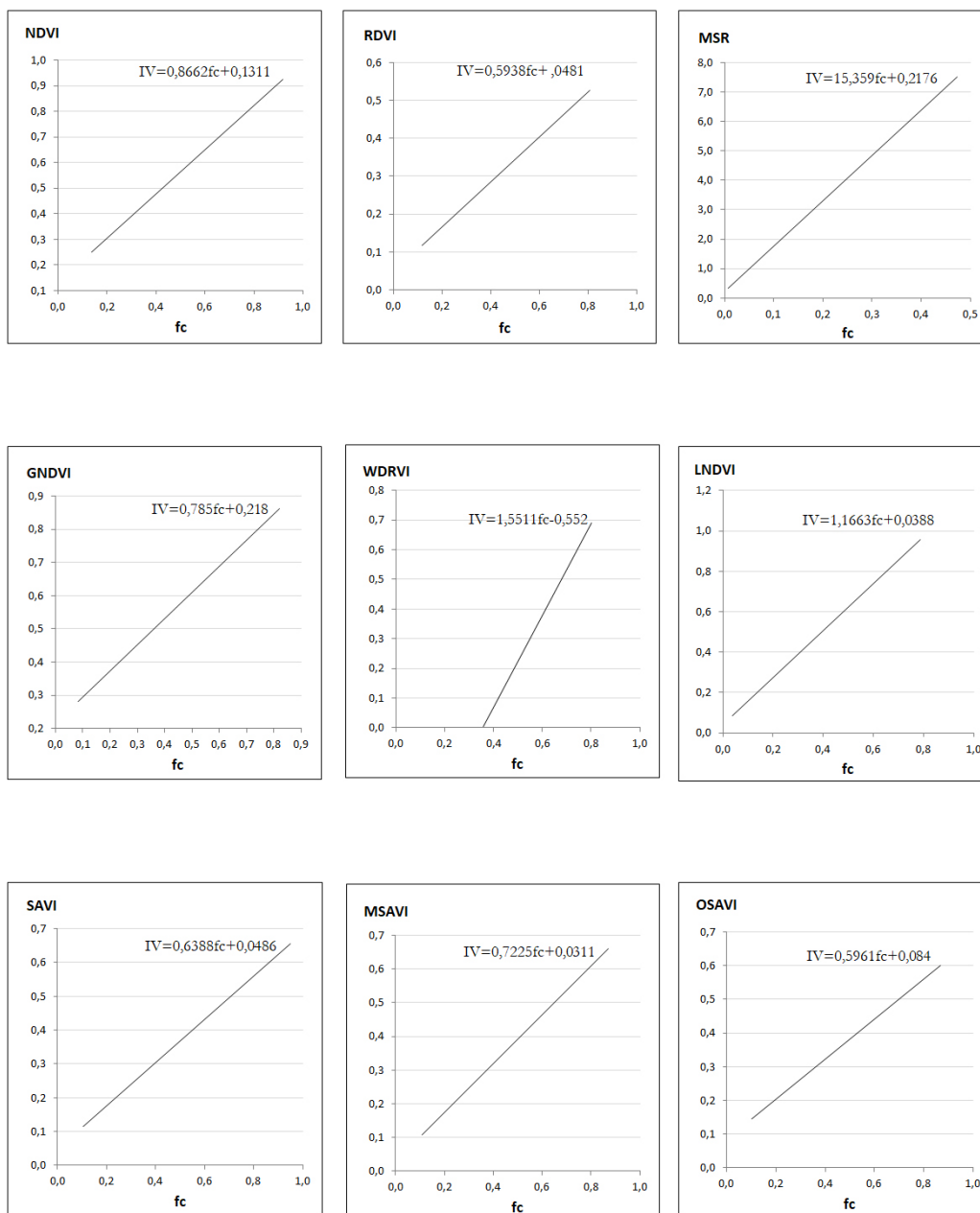


Figura 5.10. Representación del índice de vegetación y la fracción de cobertura vegetal en la zona de La Dehesa.

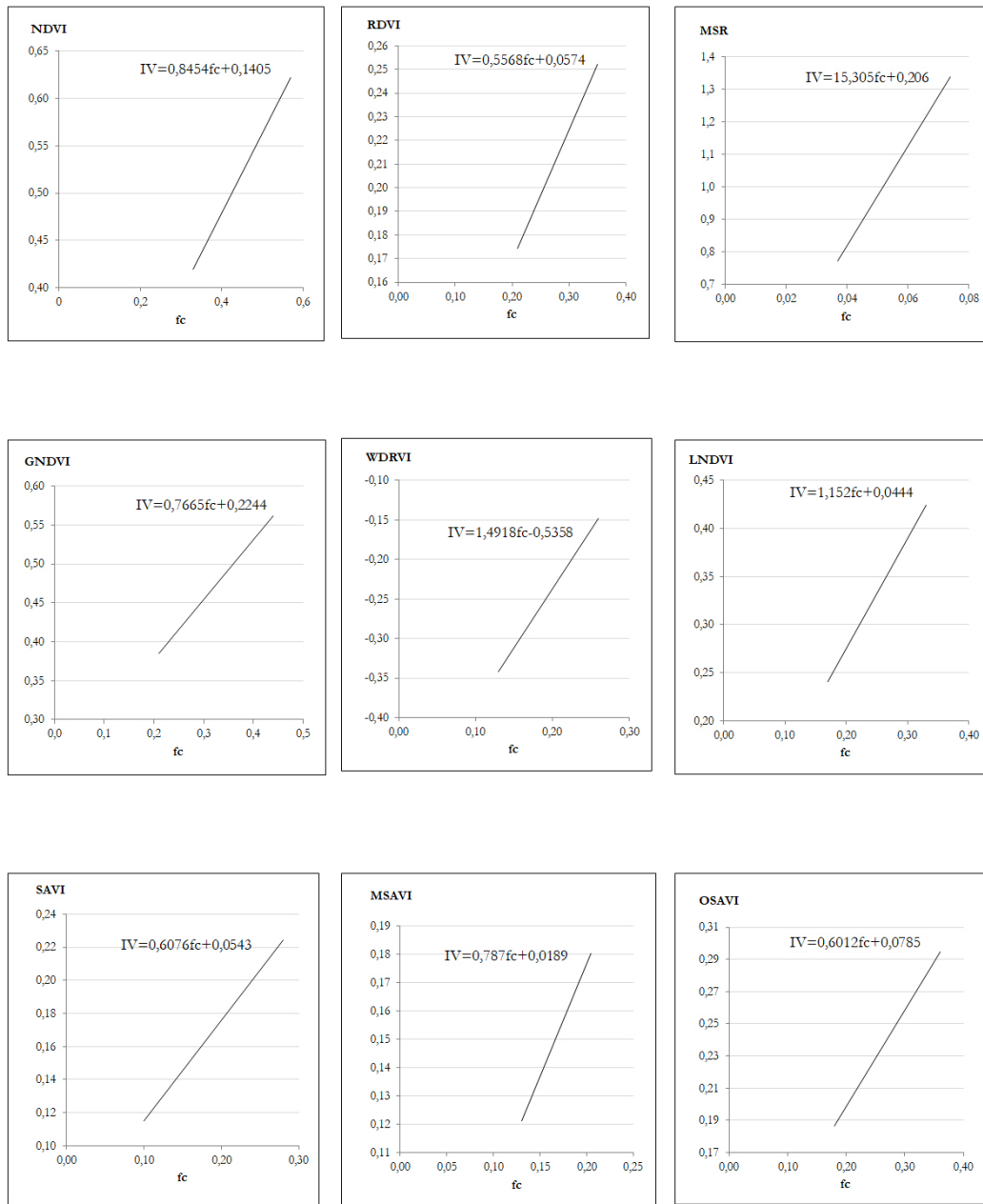


Figura 5.11. Representación del índice de vegetación y la fracción de cobertura vegetal para la sabina.

En cuanto a la RMSE (figura 5.12 y tabla 5.3), los índices que derivan del SAVI presentan los menores valores, con un mayor ajuste de la regresión lineal en los puntos de control. En particular es el MSAVI el que muestra el mejor valor. En contraposición, los índices WDRVI y GNDVI son los que tienen mayor error. Por lo tanto, los valores de la fracción de cobertura vegetal para el MSAVI en la sabina de La Dehesa para los puntos de *Juniperus* representados muestran una menor desviación.

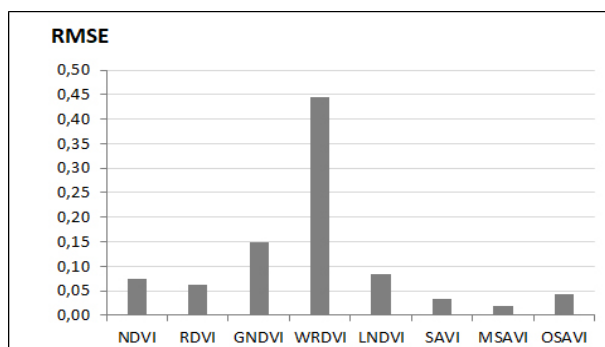


Figura 5.12. Valores de la raíz del error cuadrático medio de la fracción de cobertura vegetal para los índices de vegetación en los puntos de control del *Juniperus turbinata*.

5.3.3.1. Eficacia de los índices de vegetación.

Los valores que se muestran en la tabla 5.4 indican que para el coeficiente de Leprieur el índice MSR presenta una mayor eficacia en la sabina y el WDRVI en el sabinar. En cambio, el NDVI y el GNDVI son los que presentan los valores más altos. Para el modelo RER los índices SAVI y MSAVI son los que proporcionan mayor sensibilidad. En el caso del NE los mejores índices que detectan cambios cuantitativos en la fracción de cobertura vegetal son el MSAVI y el SAVI.

En conclusión, el índice WDRVI seguido del MSR son los que muestran una mayor sensibilidad y homogeneidad de la fracción de cobertura vegetal en el sabinar. En las sabinas el MSR, el MSAVI y el SAVI son los índices que presentan más sensibilidad.

Tabla 5.4. Resultados del coeficiente de Leprieur, RER y NE para los índices de vegetación en el rango de los valores de la f_c en los puntos de control del *Juniperus turbinata*. Coeficiente de Leprieur* para la zona del sabinar.

	NDVI	RDVI	MSR	GNDVI	WDRVI	LNDVI	SAVI	MSAVI	OSAVI
Leprieur	0,62	0,38	0,082	0,62	-0,16	0,29	0,28	0,19	0,40
Leprieur*	0,65	1,31	0,51	1,72	0,14	0,53	0,58	0,54	0,64
RER	3,23	2,23	--	1,55	0,29	1,88	5,42	4,42	4,19
NE	0,088	0,11	--	0,19	0,30	0,074	0,055	0,023	0,072

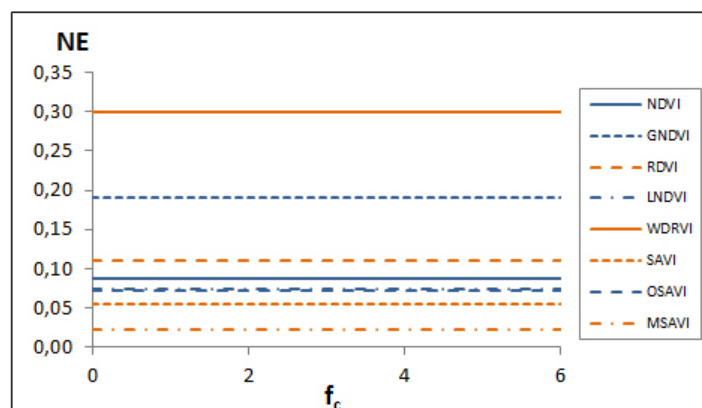


Figura 5.13. Sensibilidad de los diferentes índices de vegetación según el modelo *Noise Equivalent* (NE) para la f_c en los puntos de control de sabina.

5.3.4. LEAF AREA INDEX (LAI).

Para la zona de control del sabinar, la relación entre los índices de vegetación y el LAI ha sido a través de una función exponencial del tipo $IV = a - b \cdot e^{-k \cdot LAI}$ (tabla 5.5 y figura 5.14), presentando un valor asintótico variable según el índice de vegetación que corresponde al valor de saturación. Todos los índices aumentan de manera casi lineal para valores bajos del LAI y a continuación para un valor determinado del LAI hay un crecimiento asintótico con variaciones muy pequeñas del índice de vegetación. Los valores de la desviación estándar varían entre 0,07 y 0,59 para los diferentes índices de vegetación. Las tablas 5.5 y 5.6 muestran que los índices MSR, MSAVI y SAVI presentan una menor desviación respecto al valor medio, en cambio el NDVI y el GNDVI tienen los valores mayores.

Tabla 5.5. Valores de LAI para los diferentes índices de vegetación.

	NDVI	RDVI	MSR	GNDVI	WDRVI	LNDVI	SAVI	MSAVI	OSAVI
Máximo	7,85	12,07	5,75	3,65	6,15	6,21	11,72	8,67	10,16
Mínimo	0	0	0	0	0	0	0	0	0,067
Medio	0,43	0,25	0,04	0,38	0,17	0,21	0,21	0,17	0,35

Tabla 5.6. Valores mejor ajustados de los parámetros en las relaciones LAI-IV y estadísticas. Los parámetros a y b corresponden a la función $IV = a - b \cdot e^{-k \cdot LAI}$

	NDVI	RDVI	MSR	GNDVI	WDRVI	LNDVI	SAVI	MSAVI	OSAVI
IV_s	0,13	0,05	0,2	0,22	-0,55	0,04	0,05	0,03	0,075
IV_∞ (a)	1	0,642	15,593	1	1	1,2	0,681	0,754	0,685
$IV_s - IV_\infty$ (b)	0,87	0,592	15,393	0,78	1,55	1,16	0,631	0,724	0,61
LAI_u	3,6	3	4,6	3,5	4,6	4,1	3,1	3,3	3
SD	0,59	0,31	0,07	0,44	0,31	0,32	0,27	0,21	0,38

IV_s es el valor a las condiciones de suelo desnudo. IV_∞ es el valor para el $LAI = \infty$. $IV_s - IV_\infty$ es el rango dinámico. LAI_u es el valor umbral del LAI cuando un IV alcanza un régimen asintótico.

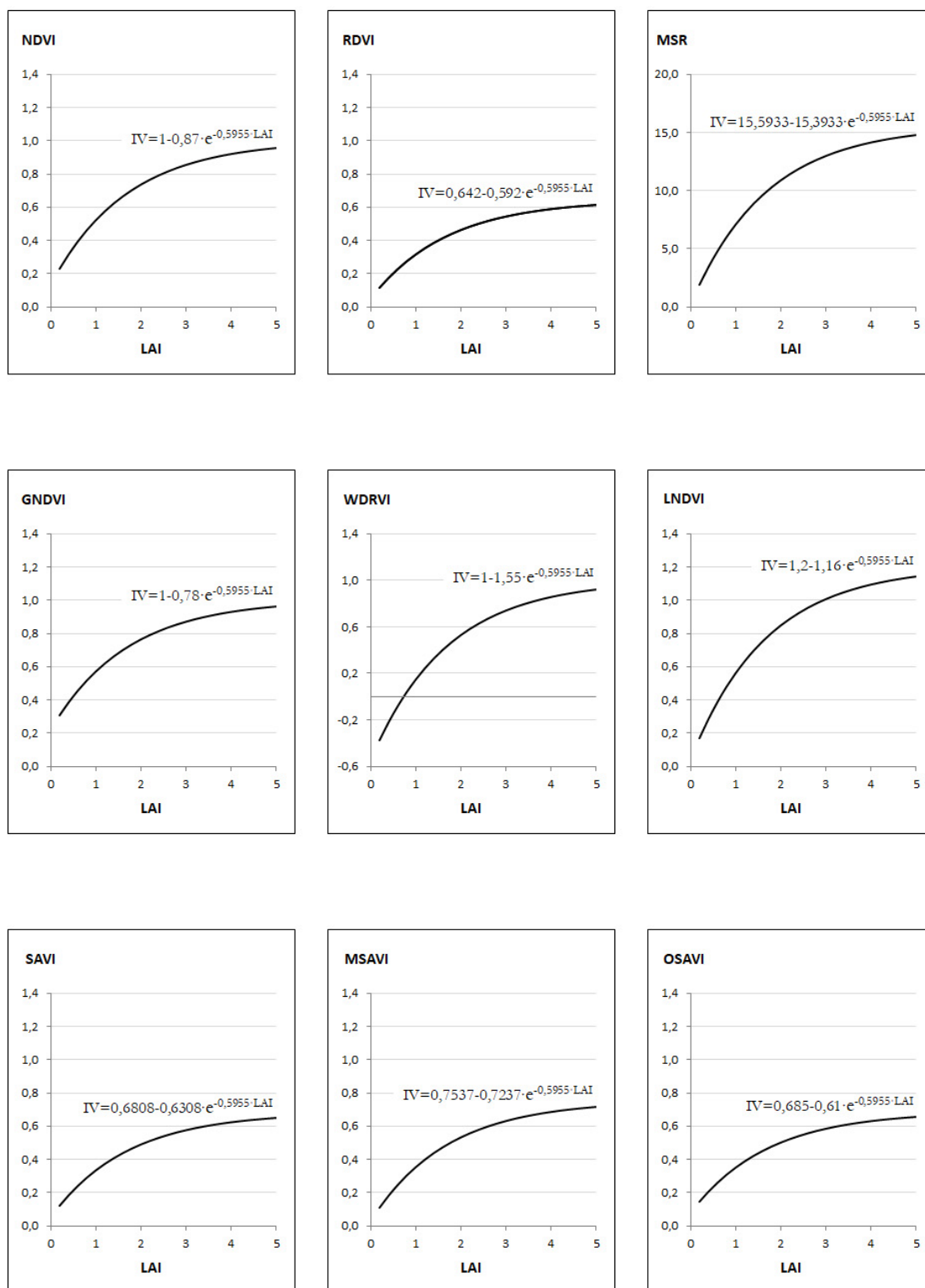


Figura 5.14. Representación de la función exponencial entre el LAI y el índice de vegetación.

Todos los índices presentan valores de saturación entre 3 y 4,6 del LAI. El OSAVI, el RDVI y el SAVI alcanzan antes la saturación respecto a los valores medios de LAI (figura 5.15 A). En el caso del GNDVI el punto de saturación está muy próximo al valor máximo del LAI, lo que indica que casi no tiene saturación para el rango del LAI. Respecto a los valores del IV (figura 5.15 B), el OSAVI y el RDVI presentan menor intervalo entre el valor medio y el de saturación, al contrario del MSR, el WDRVI y el LNDVI.

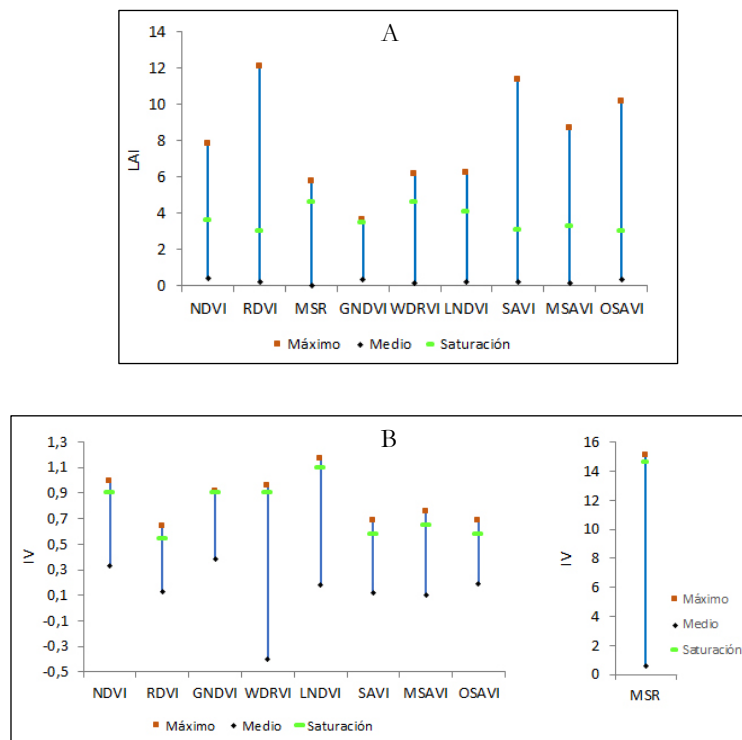


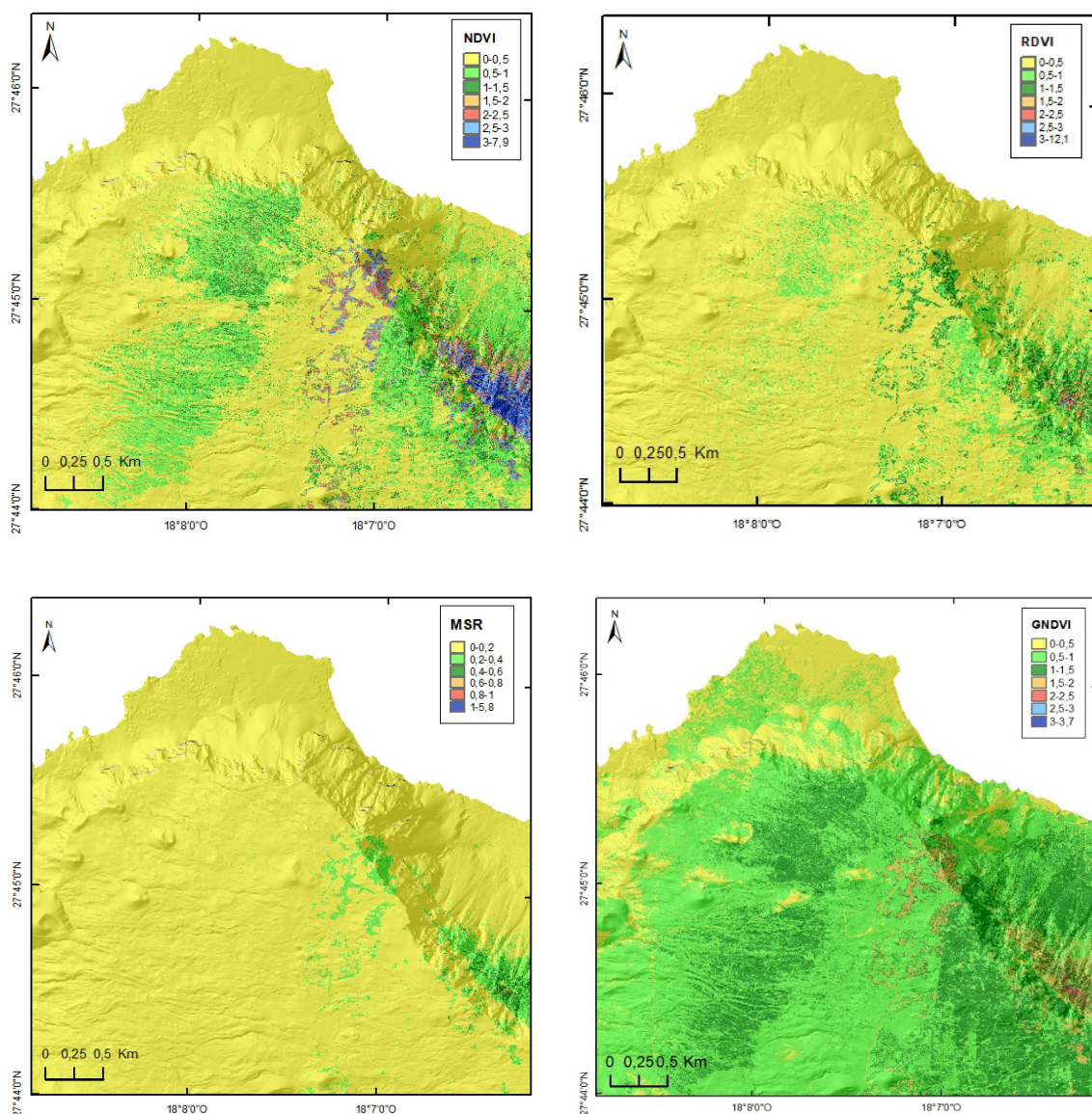
Figura 5.15. Valores máximos, medios y de saturación para (A) el LAI y (B) el índice de vegetación.

El análisis de la figura 5.10 B indica que la variabilidad entre el valor medio y el valor de saturación es mayor en el MSR y el WDRVI y menor en el OSAVI, el RDVI y el SAVI. Para valores de LAI en el intervalo de 1 a 3, los índices MSR y WDRVI son los que detectan mejor los cambios, mientras que el OSAVI y el RDVI presentan una menor variabilidad cuantitativa. Los índices muestran una relación asintótica con el LAI, constatando una alta sensibilidad para los valores comprendidos en un rango de bajo a intermedio, y baja en valores próximos a la saturación. Esta menor sensibilidad para valores altos del LAI corresponde a cubiertas más densas.

En función de la sensibilidad y la desviación de los valores en la estimación del LAI, los índices que proporcionan mejores resultados son el MSR y el WDRVI. En cambio, el OSAVI y el RDVI son los índices que presentan menos sensibilidad (figuras 5.14 y 5.15). Aunque el índice más utilizado para obtener el LAI ha sido el NDVI, se puede observar

(figura 5.14.) que no es el que presenta la mejor sensibilidad (Chen, 1996b; Turner *et al.*, 1999; Cohen *et al.*, 2003; Navarro-Cerrillo, 2013).

En la figura 5.16 se observan los valores más elevados en la zona noreste que corresponde al sabinar húmedo con máximos del LAI. Los índices MSR y MSAVI son los que presentan más homogeneidad con valores bajos del LAI ocupando la mayor parte de La Dehesa para valores de 0 a 0,5 para el MSAVI y de 0 a 0,2 para el MSR, mostrando un claro contraste entre el sabinar seco y el húmedo. El índice GNDVI es el que presenta mayor superficie de densidad de hojas, con predominio del rango 0,5-1,5. En cuanto a los valores más elevados del LAI, a partir de 3, el índice NDVI es el que presenta una mayor superficie con 34.056 píxeles (0,84%).



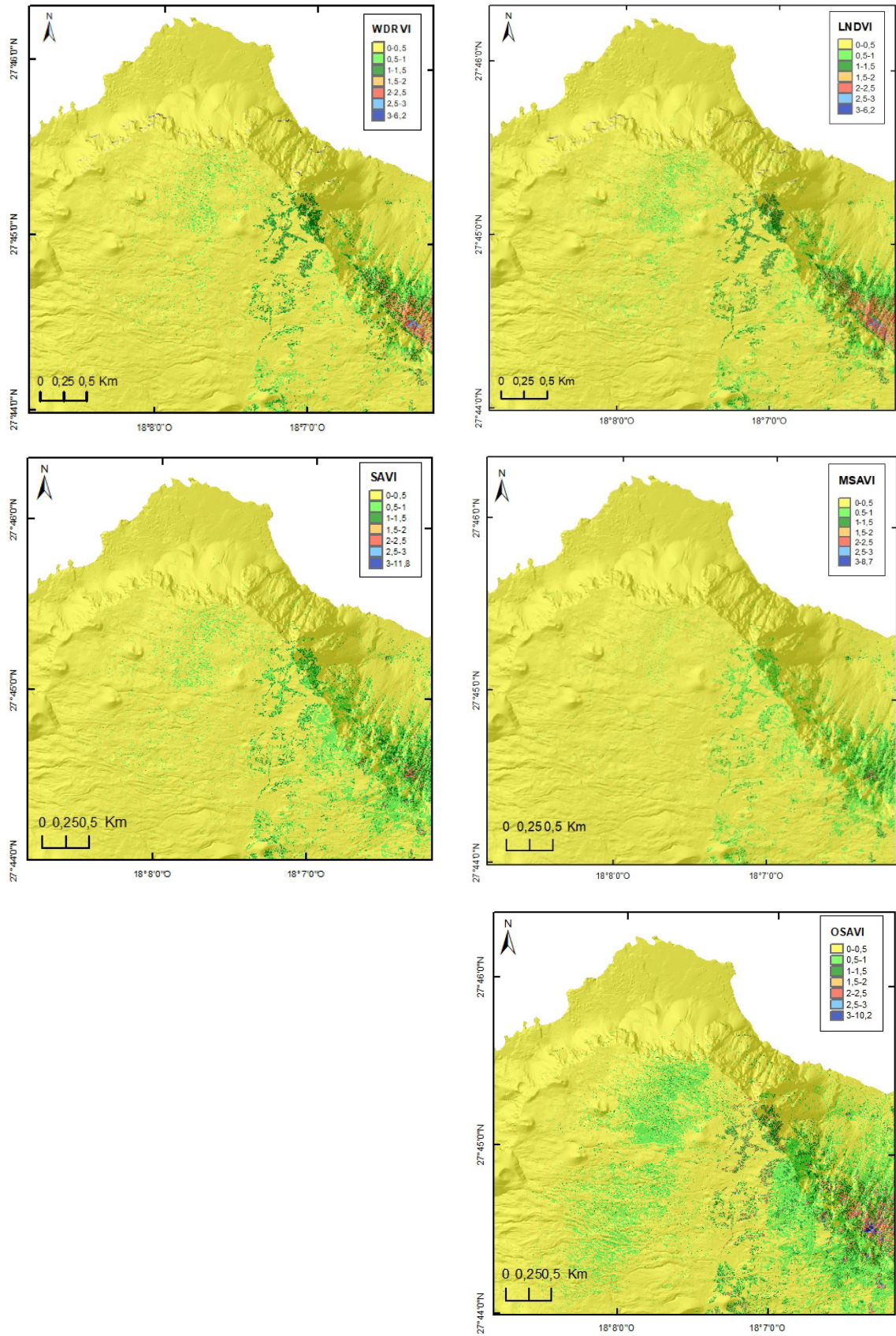


Figura 5.16. Valores del LAI para los índices de vegetación en el sabinar de La Dehesa.

En la tabla 5.7 y en la figura 5.17 se muestran los resultados de la localización de *Juniperus turbinata* en La Dehesa. Hay que tener en cuenta que, la precisión de estos resultados es función de la representatividad de los puntos de control que, en este caso, como se explica en la metodología fueron de 100 puntos.

Tabla 5.7. Valores de LAI para los diferentes índices de vegetación: a y b son los parámetros de la función $IV=a+b \cdot LAI$.

	NDVI	RDVI	MSR	GNDVI	WDRVI	LNDVI	SAVI	MSAVI	OSAVI
Máximo	1,2068	0,5816	0,0481	0,9107	0,5151	0,5800	0,4971	0,3637	0,7271
Mínimo	0,6877	0,2728	0,0262	0,4867	0,2444	0,3093	0,1705	0,1234	0,3041
a	0,2982	0,3118	22,065	0,3069	0,7400	0,5343	0,3473	0,4331	0,2916
b	0,2207	0,0683	0,2070	0,2699	0,5186	0,0713	0,0629	0,0384	0,1001
RMSE	0,4390	0,2300	--	0,2110	0,6140	0,9430	0,1670	0,1070	0,2720

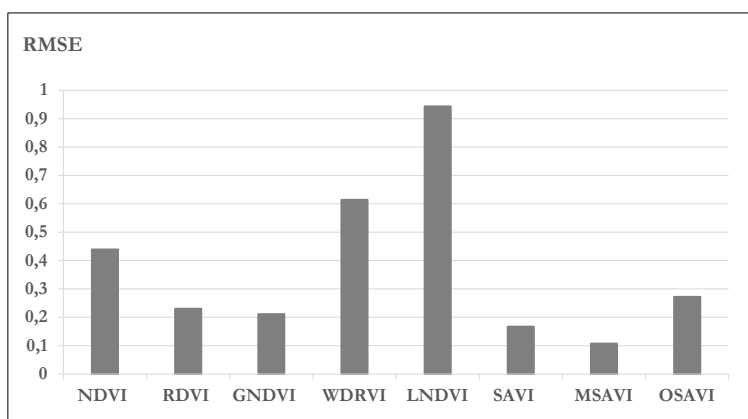


Figura 5.17. Valores de la raíz del error cuadrático medio del LAI para los índices de vegetación en los puntos de control del *Juniperus turbinata*.

La función de ajuste ha sido una regresión lineal como se representa en la figura 5.18. El error cuadrático medio presenta una variabilidad de 0,1070 a 0,9430 en función del índice de vegetación. Los índices NDVI y GNDVI presentan un mayor rango de valores del LAI, en cambio el MSAVI y el MSR muestran el menor intervalo, con lo que delimitan mejor los valores de la sabina, haciendo que sea más fácil la diferenciación entre especies. En cuanto a la variabilidad relativa del LAI en función del índice de vegetación es más acusada en el MSAVI con respecto al resto de índices lo que implica una mayor sensibilidad y menor en el WDRVI. Una mayor variación relativa en el rango del LAI para los valores del índice de vegetación implica una mayor eficacia del índice. Por lo tanto, el índice que presenta mayor eficacia en los puntos de control es el MSAVI. Este mejor comportamiento del MSAVI también lo obtiene Wu *et al.* (2007) al comparar los índices NDVI, SAVI, PVI, TSAVI y MSAVI con imágenes Quickbird.

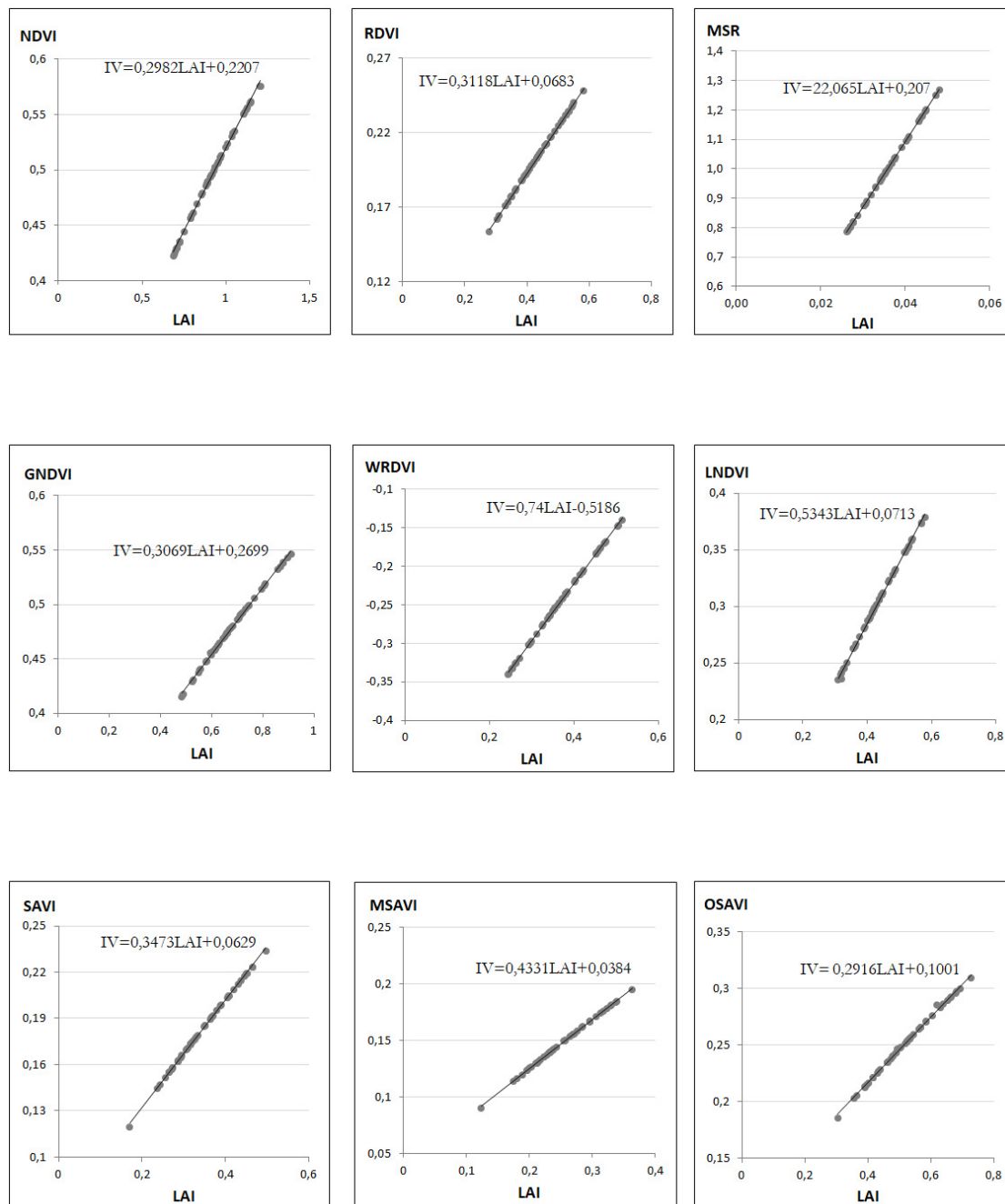


Figura 5.18. Representación de la función lineal entre el LAI y el índice de vegetación para el *Juniperus turbinata*.

5.3.4.1. Eficacia de los índices de vegetación.

Los resultados de los métodos aplicados se muestran en la tabla 5.8 A partir de los valores del LAI en la sabina, el coeficiente de Leprieur al ser inversamente proporcional a la

eficacia del índice de vegetación indica que el MSR y el MSAVI presentan los mejores resultados, ya que se obtienen los valores menores de este coeficiente. Este resultado no coincide con el obtenido por Gilabert *et al.* (1997) donde presenta como mejor índice el OSAVI, aunque los autores remarcan que sus resultados no se pueden generalizar. En cambio, el NDVI y el GNDVI muestran los peores resultados. Si observamos los resultados que proporciona el método RER, los valores más altos corresponden al MSAVI, al GNDVI y al SAVI, mientras que LNDVI y WDRVI muestran menor eficiencia. Finalmente, el modelo *Noise Equivalent* (NE) indica una mayor sensibilidad para el MSAVI y el SAVI. En este modelo, como la función de regresión entre los índices de vegetación y el LAI es lineal, su derivada es constante, y por lo tanto los valores de NE de cada índice de vegetación no cambian en función del LAI (figura 5.19).

El análisis de la zona del sabinar indica que los valores menores del coeficiente de Leprieur los presenta el WNDVI. Los peores valores son para el NDVI, GNDVI, LNDVI y el RDVI y los mejores para el WDRVI, SAVI y MSAVI.

Tabla 5.8. Resultados del coeficiente de Leprieur, RER y NE para los índices de vegetación en el rango de los valores del LAI en los puntos de control del *Juniperus turbinata*. Coeficiente de Leprieur* para la zona del sabinar.

	NDVI	RDVI	MSR	GNDVI	WDRVI	LNDVI	SAVI	MSAVI	OSAVI
Leprieur	1,70	0,65	0,047	1,59	-0,33	0,58	0,51	0,32	0,86
Leprieur*	2,63	2,37	1,99	2,62	1,06	2,44	1,90	1,93	2,13
RER	1,18	1,34	--	2,01	0,44	0,29	1,96	2,25	1,56
NE	1,47	0,74	--	0,69	0,83	1,76	0,48	0,39	0,93

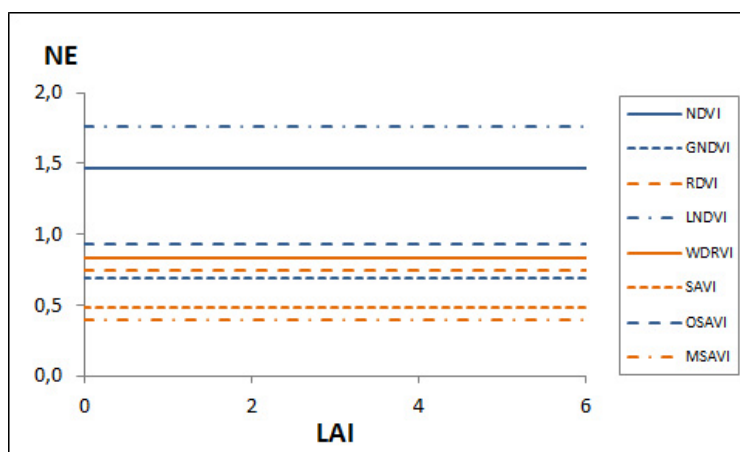


Figura 5.19. Sensibilidad de los diferentes índices de vegetación según el modelo *Noise Equivalent* (NE) para el LAI en los puntos de control de sabinar.

Las diferencias que se producen en la eficacia de los índices son debidas a que en un caso consideramos toda la heterogeneidad de la cubierta vegetal de la zona, y en el otro lo concretamos a una sola especie. Cuando nos encontramos con diversidad vegetal como en el sabinar, obtenemos unos índices de vegetación que representan esta variabilidad (WDRVI, SAVI y MSAVI). Cuando es específica de una especie hay índices coincidentes en los diferentes modelos de eficacia (MSAVI, SAVI). Las diferencias entre el sabinar y la sabina son debidas a la influencia del *Juniperus turbinata* en la masa vegetal.

Se ha determinado el valor p con un nivel de significación del 0,001 a partir de la muestra de 100 puntos de control correspondientes a *Juniperus* (tabla 5.9). Al correlacionar puntos de *Juniperus* con índices de vegetación, los valores absolutos menores de t son los que presentan una mejor relación para el total de puntos que corresponden a la zona del sabinar seco.

Tabla 5.9. Valores de la prueba- t para las diferentes bandas espectrales, calculados a partir de la reflectividad en los puntos de control.

Banda	NDVI	RDVI	MSR	GNDVI	WDRVI	LNDVI	SAVI	MSAVI	OSAVI
1	-71,00	-48,80	-31,95	-60,03	n.s.	-38,57	-41,35	-33,13	-52,81
2	-71,05	-48,84	-31,98	-60,24	n.s.	-38,69	-41,39	-33,23	-52,78
3	-67,17	-40,89	-31,59	-57,13	n.s.	-36,40	-34,92	-27,57	-46,40
4	-54,25	-22,92	-29,75	-44,81	4,91	-27,94	-19,03	-12,75	-30,53

(n.s.) no significativo ($p > 0,001$)

 Valor absoluto mínimo principal. Valor absoluto mínimo secundario.

En todos los casos, excepto para el índice WDRVI, presentan efectos significativos ($p < 0,001$). La diferencia de unidades estándares entre las medias de los puntos de control y del índice de vegetación es menor para el MSAVI y el MSR. Las bandas que tienen mayor influencia en el cálculo de los índices de vegetación son la 3 y la 4, con lo que además de los dos anteriores índices también se ha de considerar el SAVI.

Se puede establecer en función de los resultados obtenidos a partir del *leaf area index* y la fracción de cobertura vegetal que los índices MSAVI y MSR son los que mejor se ajustan a la cobertura de la sabina, seguido del SAVI, aunque en algunos parámetros concretos también tengan un buen comportamiento el GNDVI y el WDRVI. En la tabla 5.10 se presentan de manera cualitativa los resultados de la validación. En función de estos resultados se ha seleccionado el MSAVI, el MSR y el SAVI para la cartografía de *Juniperus turbinata*.

Tabla 5.10. Índices de vegetación que presentan mejores resultados para el LAI y la fracción de cobertura vegetal en la sabina.

	Coeficientes	Índices de vegetación
LAI	Leprieur	MSR, MSAVI
	RER*	MSAVI, GNDVI
	NE*	MSAVI, SAVI
	Sensibilidad	MSAVI, SAVI
	RMSE*	MSAVI
f_c	Leprieur	MSR, WDRVI
	RER*	SAVI, MSAVI
	NE*	MSAVI, SAVI
	Sensibilidad	MSR, WDRVI
	SD	MSR, MSAVI
	RMSE*	MSAVI, SAVI
p	t -valor	MSAVI, MSR

(*) No determinado para el MSR.

6. CARTOGRAFÍA DE JUNIPERUS TURBINATA

*“Quien sabe hablar con ellos [los árboles],
quien sabe escucharlos, aprende la verdad.
No predicán doctrinas y recetas;
predican indiferentes al detalle,
la ley primitiva de la vida”.*

*Hermann Hesse
(El Caminante).*

6.1. CARTOGRAFÍA DE LAS SABINAS.

A partir de los resultados obtenidos en el apartado 5.3.4 y 5.3.5 se han seleccionado los índices MSAVI, MRS y SAVI, aunque este último no presenta la misma eficacia de los otros dos, para cartografiar la sabina en los sabinares de El Hierro. La obtención del MSAVI como uno de los índices que presenta una mejor respuesta entre los nueve índices seleccionados en este estudio coincide con los resultados de Yang *et al.* (2013).

En la localización de sabinas a partir de imágenes de satélite de muy alta resolución, se ha tenido en cuenta diversos factores característicos de la especie que influyen en los valores de la reflectividad, como el color, el tamaño de la copa y la cobertura vegetal que la rodea. En El Hierro se han descrito tres tipos de sabinares herreños: el sabinar seco (*Rubio fruticosae-Juniperetum canariensis*) y el sabinar con pinos (*Rubio fruticosae-Juniperetum canariensis* subas. *pinetosum canariensis*), en el extremo occidental de El Hierro en La Dehesa y en las vertientes meridionales de El Julian, y el sabinar húmedo (*Rubio fruticosae-Juniperetum canariensis* subas. *ericetosum arboreae*) al norte a barlovento, en los acantilados de El Golfo con laurisilva. En la zona oriental de El Julian y en Las Playas también se encuentra el sabinar con pino canario. Esta mezcla de especies dificulta la discriminación del *Juniperus turbinata* (figura 6.1).

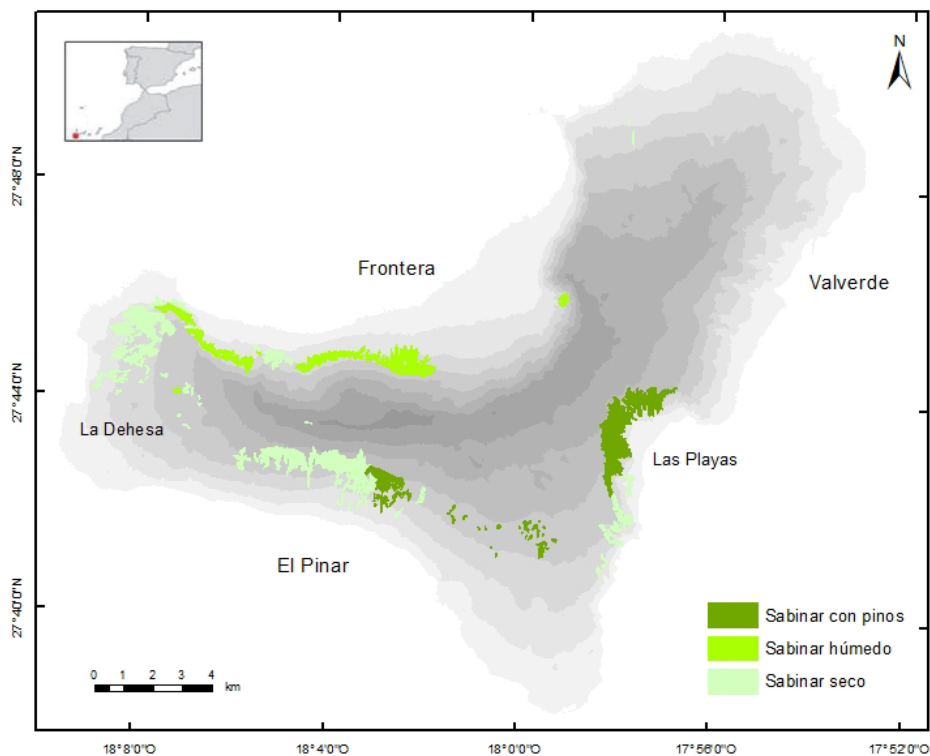


Figura 6.1. Distribución del sabinar seco y húmedo a partir de Del Arco *et al.* (2006).

La variación del color respecto a otras especies queda determinada en los valores de reflectividad. Por ello se ha establecido un rango en el cual se encuentra la sabina y se valora su caracterización respecto al pino canario. No se ha querido delimitar la presencia de cada sabina al valor máximo de intensidad que presenta un píxel, sino a un conjunto de píxeles que incluye el rango que caracteriza la superficie de la sabina, de esta manera se delimita a partir de la reflectividad el área que ocupa cada árbol.

6.2. RANGO DE REFLECTIVIDADES.

Se determina un intervalo representativo de sabina para la zona seca y otro para la zona húmeda a partir de los mejores índices de vegetación según su sensibilidad, precisión y eficacia, como se establece en el apartado 5.3. La diferencia espectral en los diferentes sabinares, se ha realizado mediante la interpretación visual (Rokhmatuloh *et al.*, 2005). Esto es posible al utilizar imágenes de muy alta resolución de 2 m de píxel.

Tabla 6.1. Rango de reflectividades (R_Q) y porcentaje de superficie (S) de sabina para los índices de vegetación según el tipo de sabinar.

	Sabinar seco		Sabinar húmedo		Sabinar con pinos	
	R _Q	S(%)	R _Q	S(%)	R _Q	S(%)
MSR	1,20 – 2,20	6,80	1,70 - 2,50	17,95	1,50 – 2,20	5,10
MSAVI	0,19 – 0,30	6,67	0,15 – 0,20	16,52	0,30 – 0,40	3,64
SAVI	0,25 – 0,40	5,58	0,25 – 0,33	16,52	0,35 – 0,45	3,76

En la figura 6.2 se puede observar la delimitación del área correspondiente a *Juniperus turbinata*. Para el sabinar seco el MSAVI es el mejor índice que identifica y delimita, sin embargo, en el sabinar húmedo es el MSR. En la zona húmeda debido a que la sabina comparte hábitat con el fayal-brezal y la laurisilva según la cota, se produce una yuxtaposición de los valores de reflectividad. Además, las condiciones orográficas, con fuertes pendientes, hacen que se produzca una mayor variabilidad en la reflectividad en una misma especie a pesar de que las imágenes han sido corregidas topográficamente. La coexistencia de diversas especies en el sabinar húmedo (Romo *et al.*, 2014) interfiere en los valores de la reflectividad, sobre todo en las bandas del infrarrojo cercano y del rojo y, por lo tanto, en los índices de vegetación ya que son estas bandas las que determinan los índices MSR, MSAVI y SAVI. En la tabla 6.1 se observa como el intervalo de reflectividades para los tres tipos de sabinar es menor en el MSAVI y mayor en el MSR. En el sabinar seco el intervalo considerado representaría el 6,67% de la superficie con el MSAVI y en el sabinar seco con pinos un 3,64%, en cambio con el MSR en el sabinar seco sería del 6,80% y en sabinar seco con pinos sería del 5,10% de la superficie y para el SAVI en el sabinar seco representaría el 5,58% y en el sabinar seco con pinos un 3,76%. En el sabinar húmedo el MSAVI presenta un resultado del 16,52%, el MSR del 17,95% y el SAVI del 16,52%. En todos los casos, el índice MSR presenta una mayor superficie de sabina, y la mayor

superficie para los tres índices es en el sabinar húmedo. Los valores obtenidos de densidad de sabinas presentan una distribución más dispersa en el sabinar seco con respecto al húmedo.

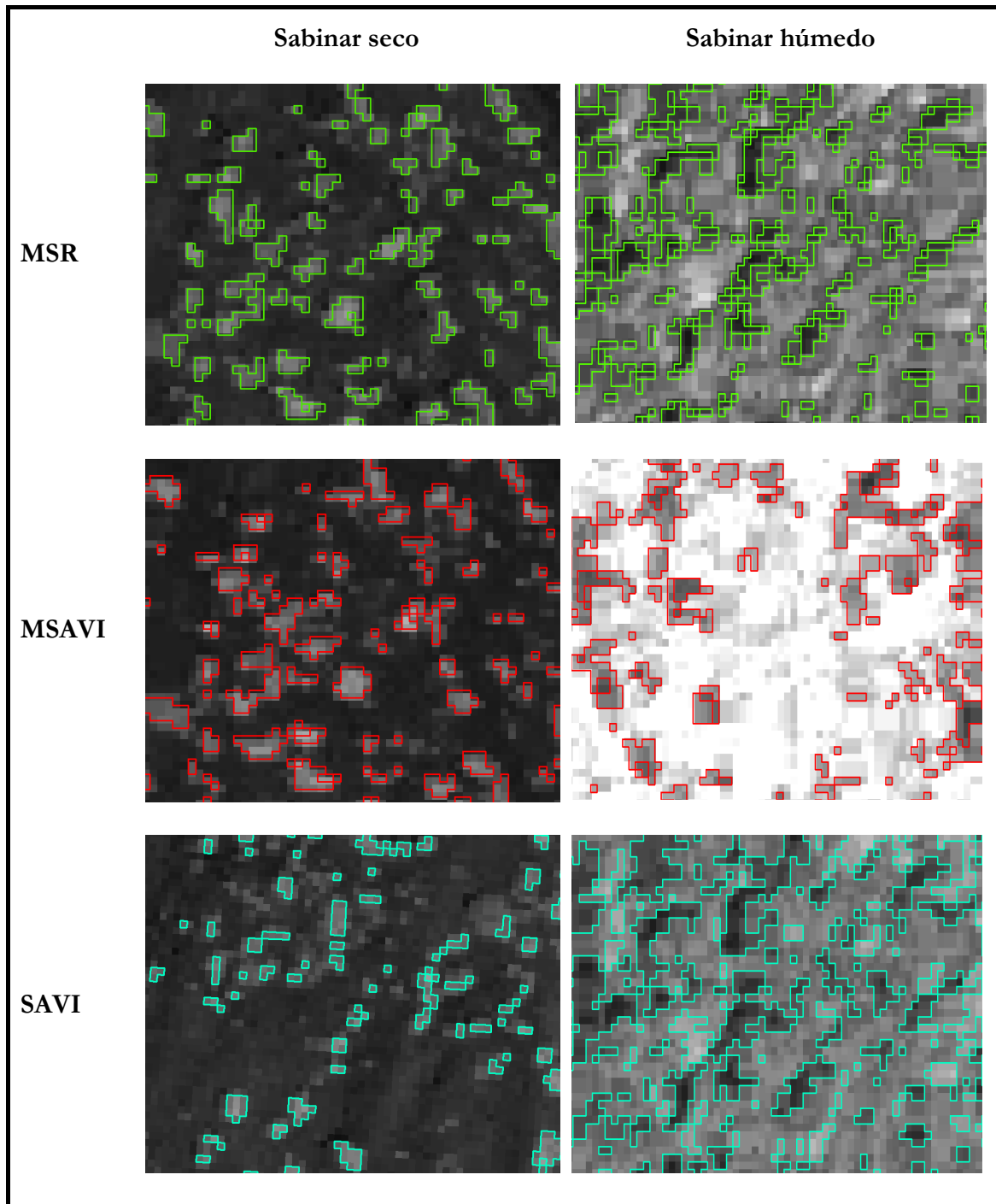


Figura 6.2. Comparativa de los tres índices de vegetación para el sabinar seco y el húmedo.

El análisis de la cartografía del *Juniperus turbinata* a partir del índice MSAVI (figuras 6.3 a 6.6) muestra diferencias según el tipo de sabinar. En el sabinar seco de La Dehesa se

observa poca densidad de sabina siendo más evidente en la parte sur. En Las Playas está representado por una delgada franja en las cotas superiores. El Julian es la zona de sabinar seco con más densidad de sabinas, aunque sin formar bosques ya que no coexiste con otras especies. En el sabinar húmedo se muestra una franja de oeste a este entre los 400 y 600 m con la mayor densidad de sabinas y es en la parte más oriental donde llega a los 800 m.

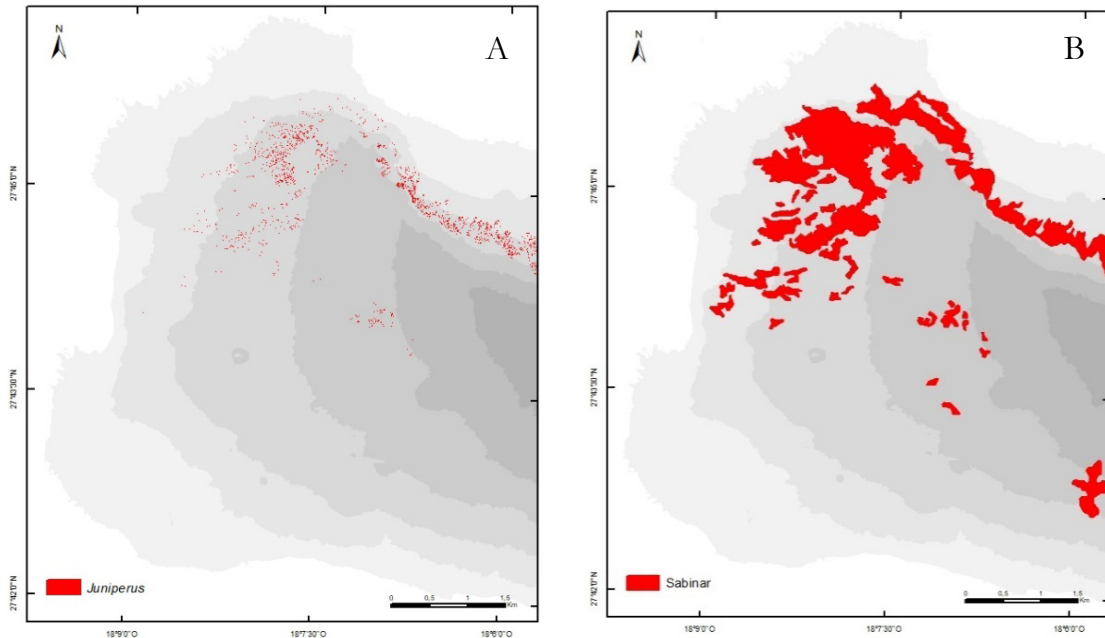


Figura 6.3. (A) Localización de *Juniperus turbinata* a partir del MSAVI en La Dehesa. (B) Comparativa con el mapa de sabinar de Del Arco *et al.* (2006).

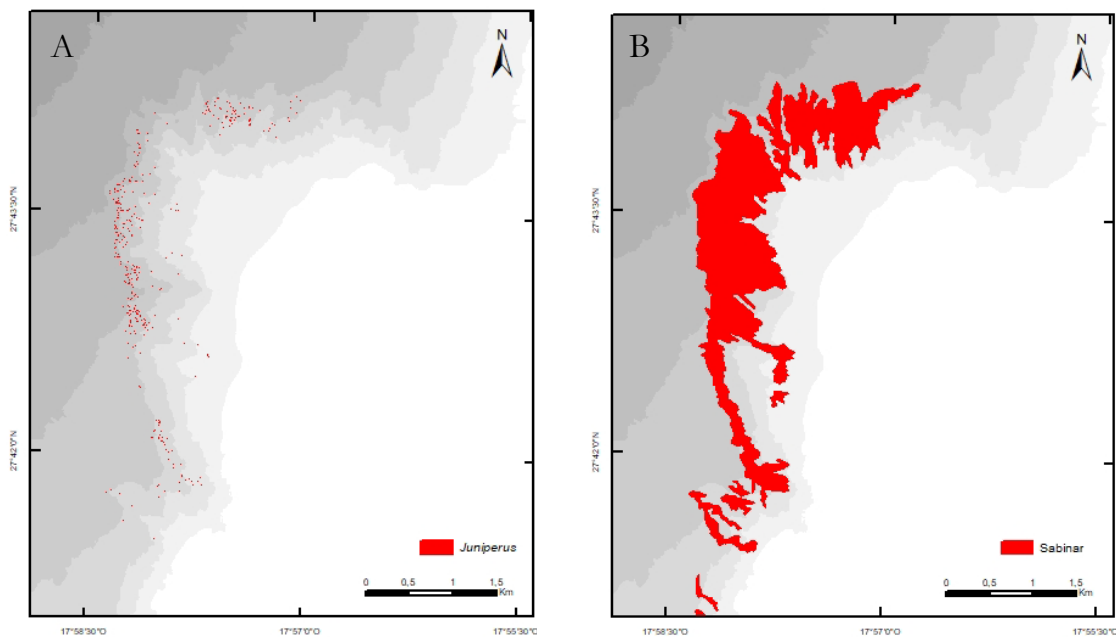


Figura 6.4. (A) Localización de *Juniperus turbinata* a partir del MSAVI en Las Playas. (B) Comparativa con el mapa de sabinar de Del Arco *et al.* (2006).

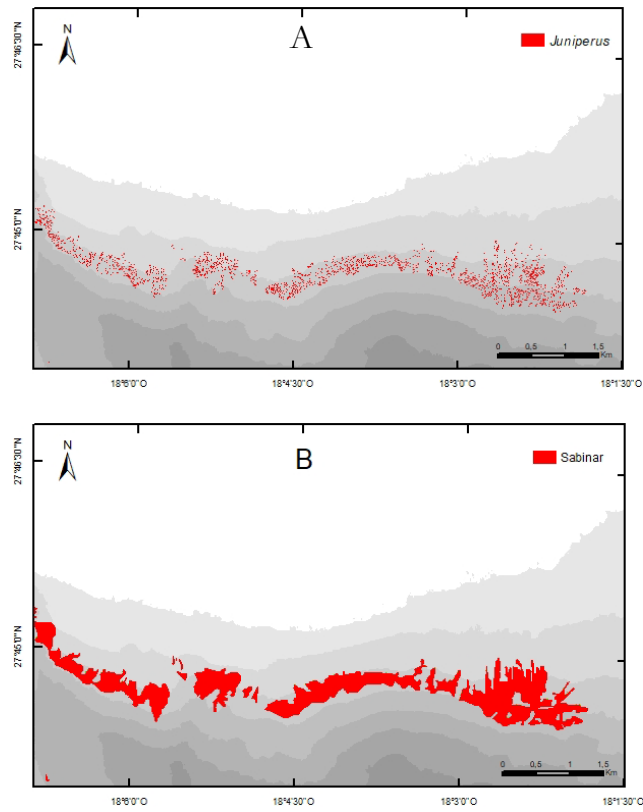


Figura 6.5. (A) Localización de *Juniperus turbinata* a partir del MSAVI en Sabinsa. (B) Comparativa con el mapa de sabina de Del Arco *et al.* (2006).

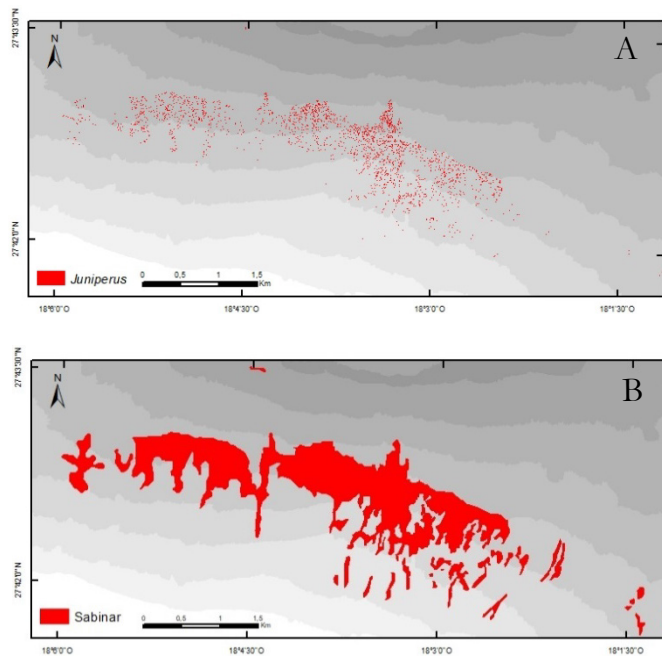


Figura 6.6. (A) Localización de *Juniperus turbinata* a partir del MSAVI en El Julan. (B) Comparativa con el mapa de sabina de Del Arco *et al.* (2006).

El índice MSR sigue el mismo patrón que el MSAVI en los tres sabinares (figuras 6.7 a 6.10). La densidad es superior que en el MSAVI sobre todo en el sabinar húmedo y en el seco con pinos. En la parte norte de La Dehesa se observa más presencia de sabinar respecto a la parte sur (figura 6.7).

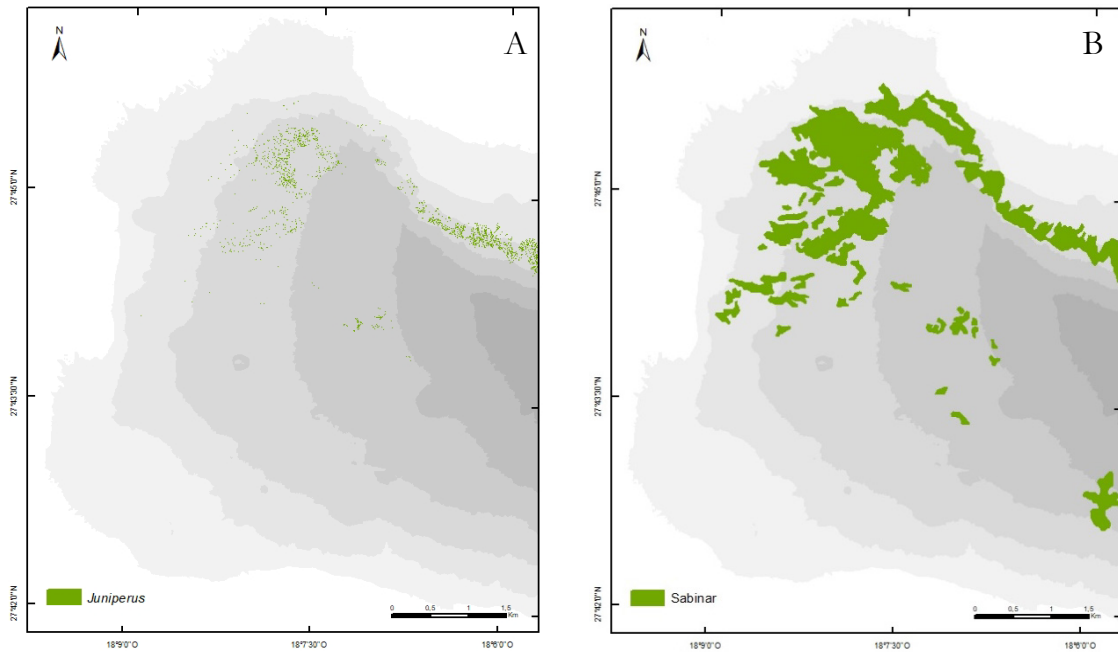


Figura 6.7. (A) Localización de *Juniperus turbinata* a partir del MSR en La Dehesa. (B) Comparativa con el mapa de sabinar de Del Arco *et al.* (2006).

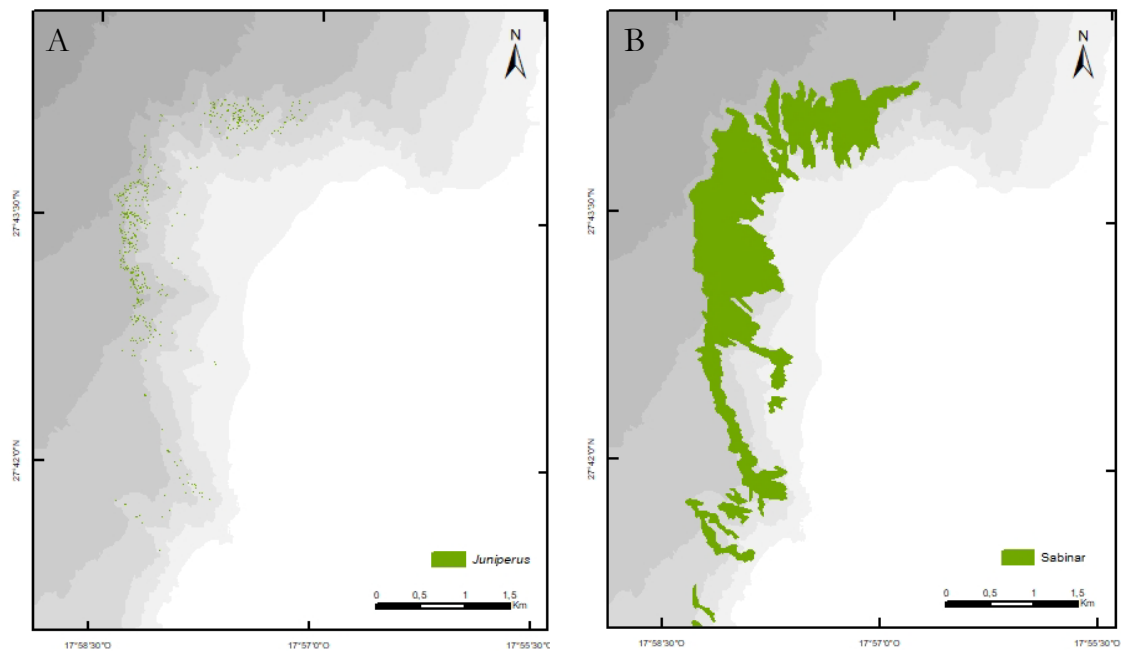


Figura 6.8. (A) Localización de *Juniperus turbinata* a partir del MSR en Las Playas. (B) Comparativa con el mapa de sabinar de Del Arco *et al.* (2006).

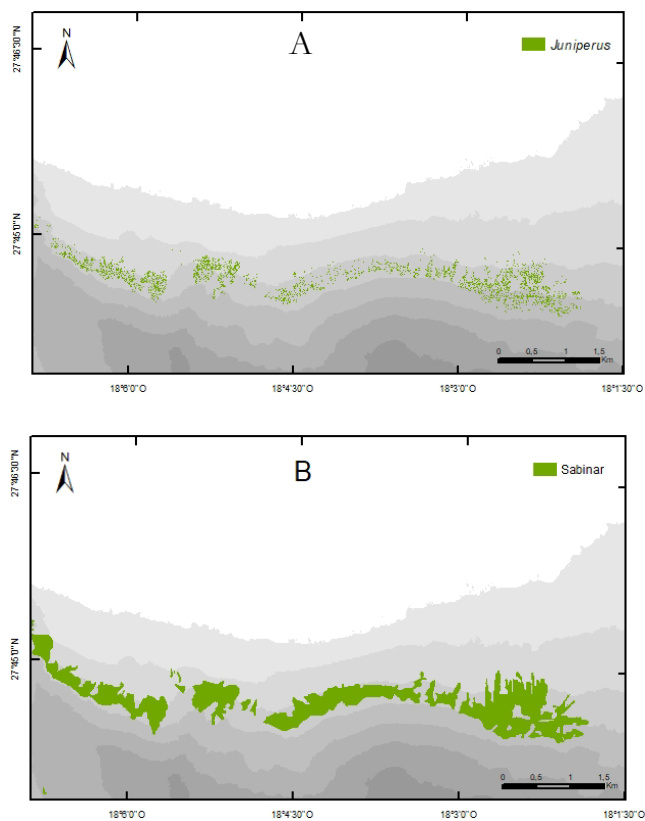


Figura 6.9. (A) Localización de *Juniperus turbinata* a partir del MSR en Sabinosa. (B) Comparativa con el mapa de sabinar de Del Arco *et al.* (2006).

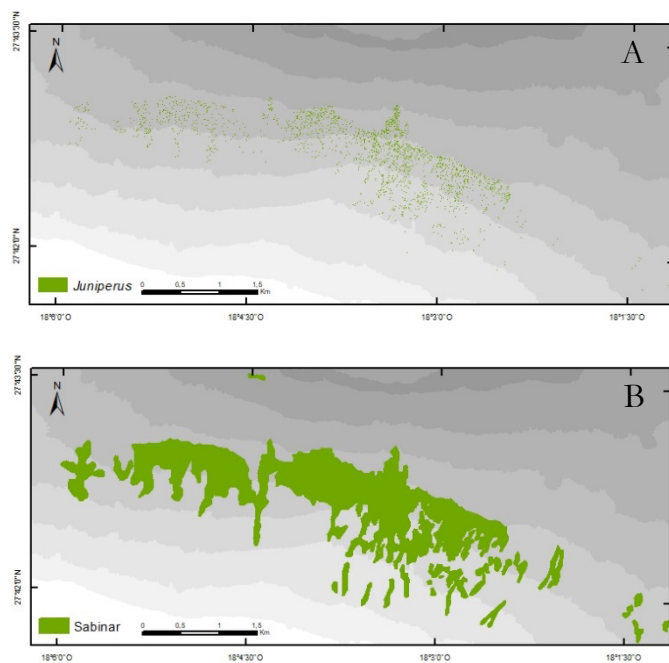


Figura 6.10. (A) Localización de *Juniperus turbinata* a partir del MSR en El Julian. (B) Comparativa con el mapa de sabinar de Del Arco *et al.* (2006).

El índice SAVI muestra una superficie de sabinar muy similar al MSAVI (figuras 6.11 a 6.14). La mayor diferencia se observa en el sabinar seco, sobre todo en La Dehesa con una menor densidad.

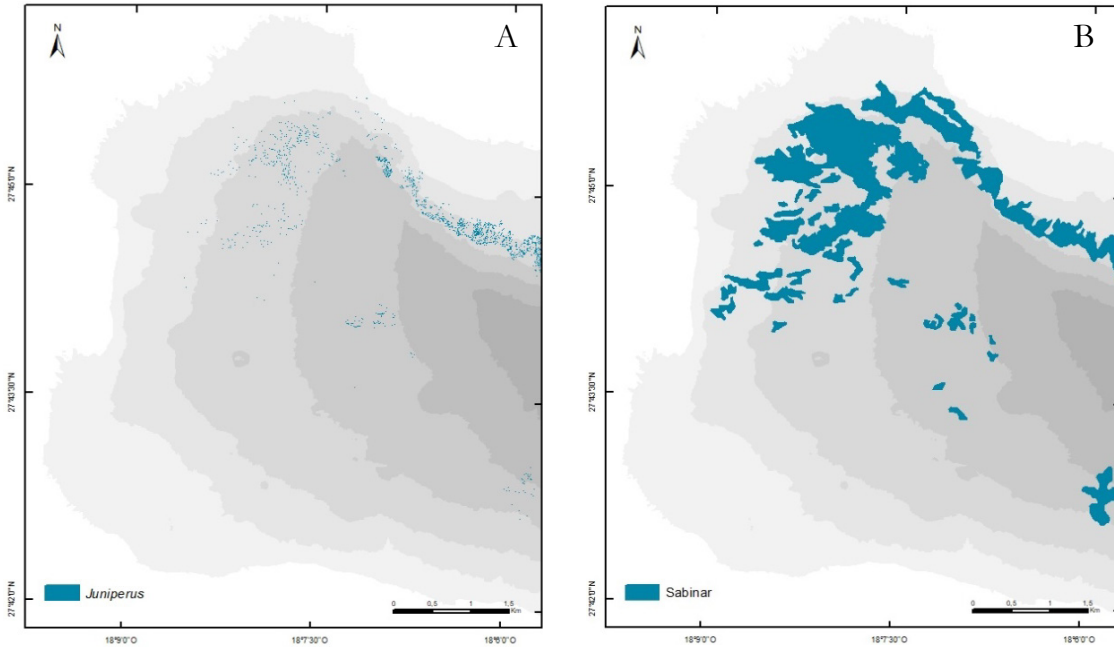


Figura 6.11. (A) Localización de *Juniperus turbinata* a partir del SAVI en La Dehesa. (B) Comparativa con el mapa de sabinar de Del Arco *et al.* (2006).

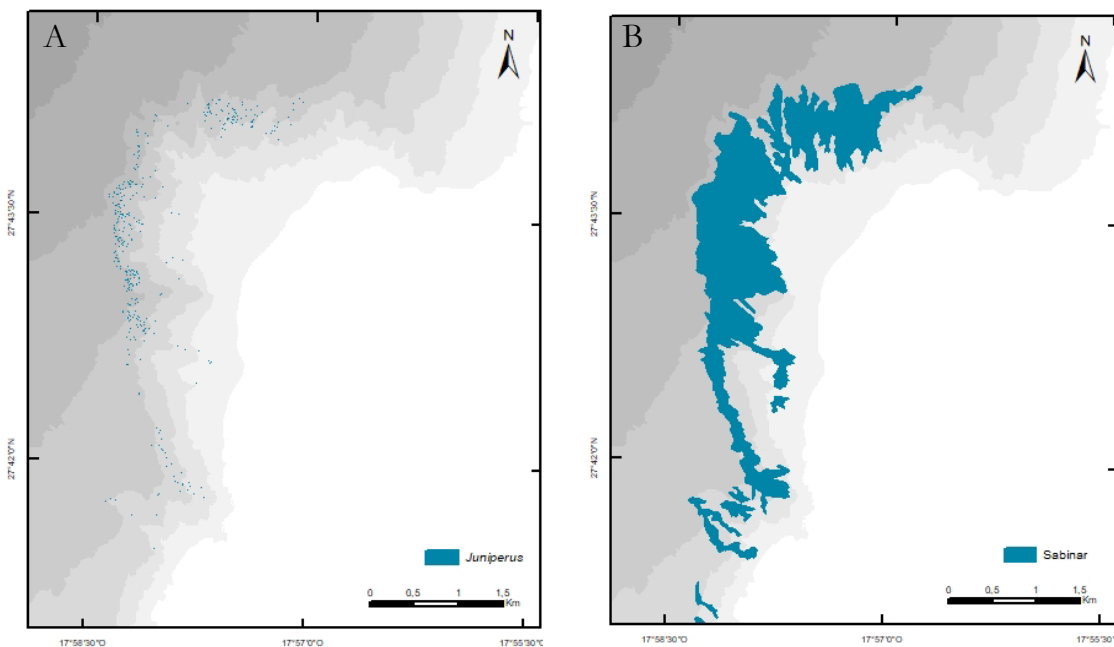


Figura 6.12. (A) Localización de *Juniperus turbinata* a partir del SAVI en Las Playas. (B) Comparativa con el mapa de sabinar de Del Arco *et al.* (2006).

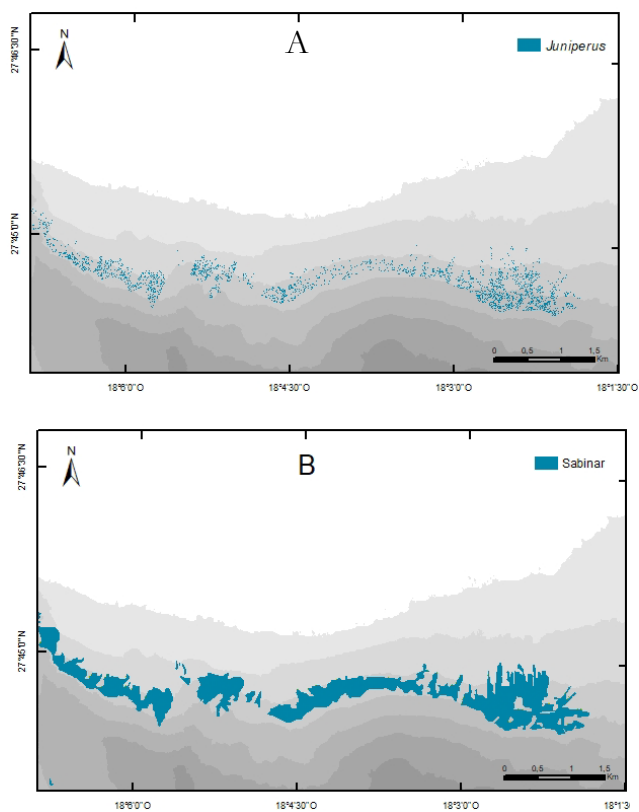


Figura 6.13. (A) Localización de *Juniperus turbinata* a partir del SAVI en Sabinosa. (B) Comparativa con el mapa de sabinar de Del Arco *et al.* (2006).

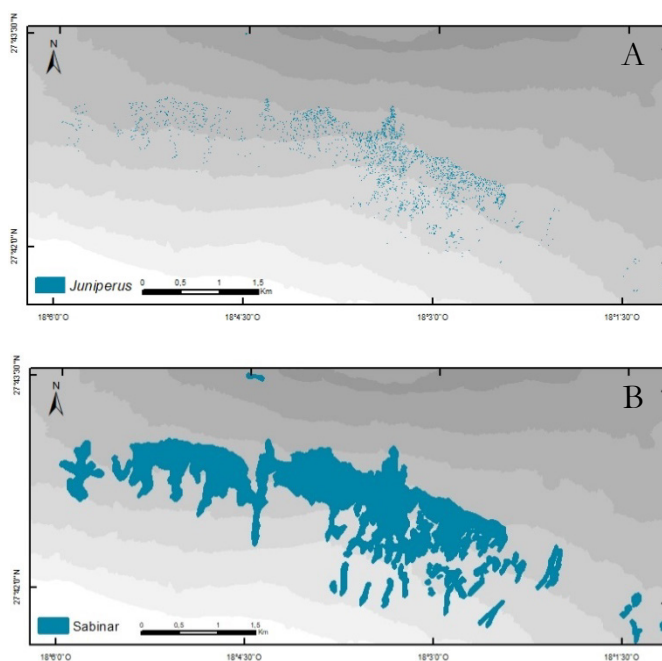


Figura 6.14. (A) Localización de *Juniperus turbinata* a partir del SAVI en El Julian. (B) Comparativa con el mapa de sabinar de Del Arco *et al.* (2006).

Los tres índices de vegetación presentan una mayor superficie de sabina en el sabinar húmedo y menor en el sabinar seco con pinos (tabla 6.1). En las figuras 6.3 a 6.14 se representa la distribución de sabina para los diferentes índices de vegetación y la superficie del sabinar según Del Arco *et al.* (2006). Los resultados dependen de las reflectividades de las bandas del infrarrojo cercano y del rojo, ya que los índices de vegetación se calculan a partir de estas bandas. Los valores obtenidos de distribución de sabinas a partir de los índices aportan información sobre la distribución y la densidad de esta especie en cada sabinar. Se observa una distribución dispersa en el sabinar seco de La Dehesa, donde las pendientes del sabinar no son muy pronunciadas y el clima es más seco, la densidad es menor (figuras 6.3, 6.7 y 6.11). En El Julan es donde el *Juniperus turbinata* está presente a cotas superiores. La mayor superficie corresponde al sabinar húmedo en los tres índices de vegetación siendo el MSR el que presenta el mayor porcentaje. En el sabinar seco con pinos es donde hay menor presencia de sabinas y en concreto en Las Playas, siendo el índice el MSAVI el que muestra el menor valor (tabla 6.1). Aunque en El Golfo también hay fuertes pendientes como en Las Playas, las condiciones climáticas favorecen la presencia de sabinas. Los tres índices muestran en general una baja presencia de *Juniperus turbinata* en relación con el potencial de ocupación que representa el sabinar.

6.2.1. DENSIDAD

Se ha determinado la densidad de *Juniperus turbinata* en los sabinares a partir de un análisis tipo kernel¹ de cuarto grado para obtener áreas suavizadas, con un radio de búsqueda de 20 m:

$$Densidad = \frac{1}{(\text{radio})^2} \sum_{i=1}^n \left[\frac{3}{\pi} \cdot \text{pop}_i \left(1 - \left(\frac{\text{dist}_i}{\text{radio}} \right)^2 \right)^2 \right] \quad \text{para } \text{dist}_i < \text{radio}$$

donde: i = puntos de entrada, pop_i = valor de campo de población del punto i , dist_i = distancia entre el punto i y la ubicación (x,y).

La zona de Sabinosa es la que muestra mayor densidad de *Juniperus turbinata* mientras que las zonas correspondientes a La Dehesa, El Julan (sabinar seco) y Las Playas (sabinar con pinos) presentan menor densidad (figura 6.15 a 6.18). En la tabla 6.2 se muestran los porcentajes de ocupación distribuidos en tres intervalos de densidad para cada sabinar.

Tabla 6.2. Porcentaje de la densidad para los índices de vegetación según el tipo de sabinar (S: seco, H: húmedo, P: con pinos).

Árboles/ha	MSAVI			MSR			SAVI		
	S	H	P	S	H	P	S	H	P
0-200	66,4	37,4	74,4	64,1	41,3	65,5	71,6	42,8	72,6
200-1.000	33,0	61,1	25,6	33,0	47,9	34,2	26,9	52,2	27,3
<1.000	0,6	1,5	0,0	2,9	10,8	0,3	1,5	5,0	0,1

¹ Calcula la densidad de las entidades de punto de alrededor de cada celda ráster de salida.

Para valores muy bajos de densidad (0-200), los tres índices presentan menor superficie en el sabinar húmedo. Para valores entre 200 y 1.000 de densidad es el sabinar húmedo el que proporciona mayor superficie. Se observa que la ocupación para valores superiores a 1.000 es muy pequeña, siendo mayor en el sabinar húmedo y menor en el sabinar con pinos. Para los tres índices es en el sabinar húmedo donde encontramos mayor densidad, y en el sabinar con pinos donde hay menor. Además, el que casi todo el porcentaje de densidad se encuentre en valores inferiores a 1.000 constata la distribución aislada del *Juniperus turbinata*.

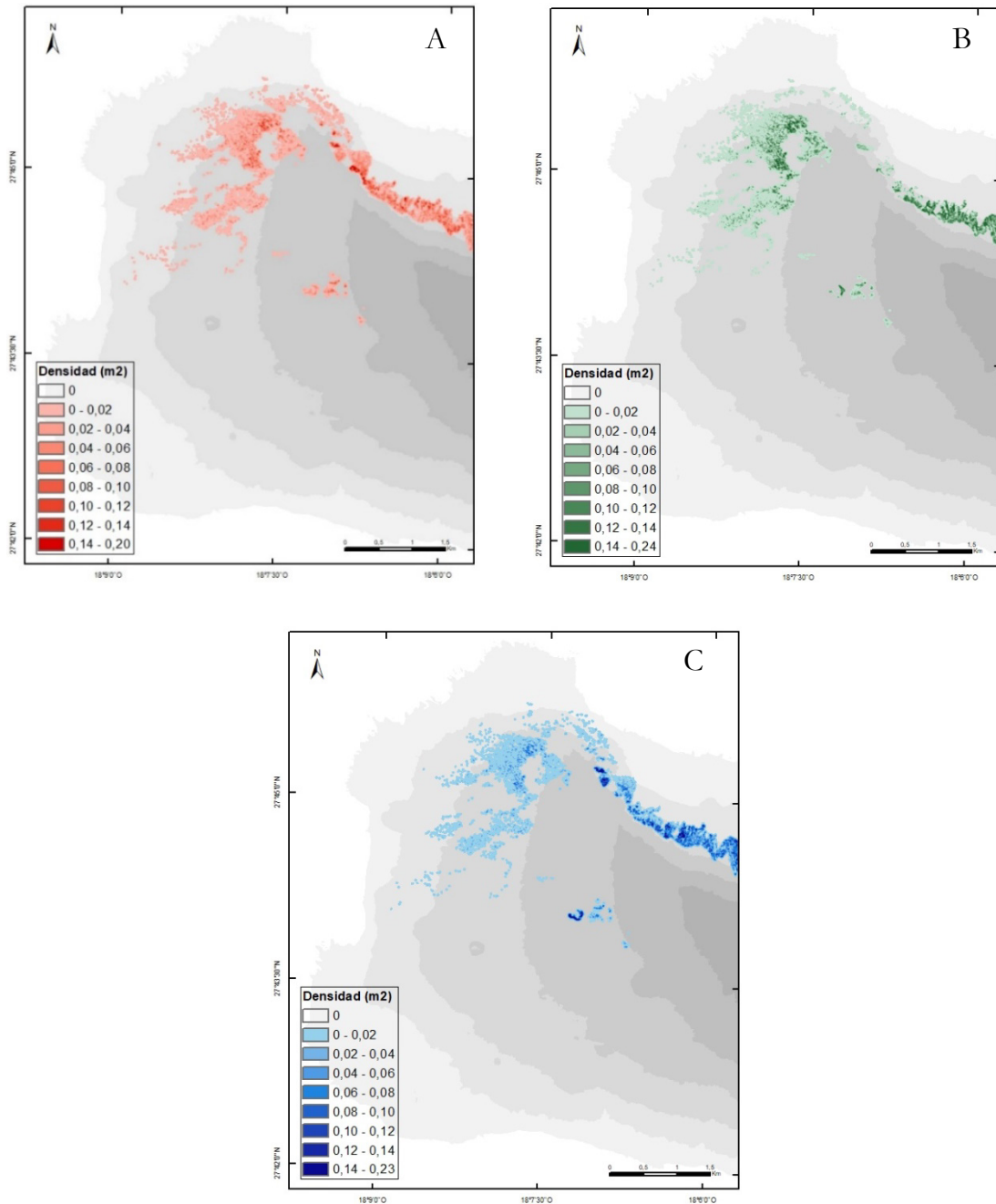


Figura 6.15. Densidad de *Juniperus turbinata* en La Dehesa según los índices de vegetación: (A) MSAVI, (B) MSR y (C) SAVI.

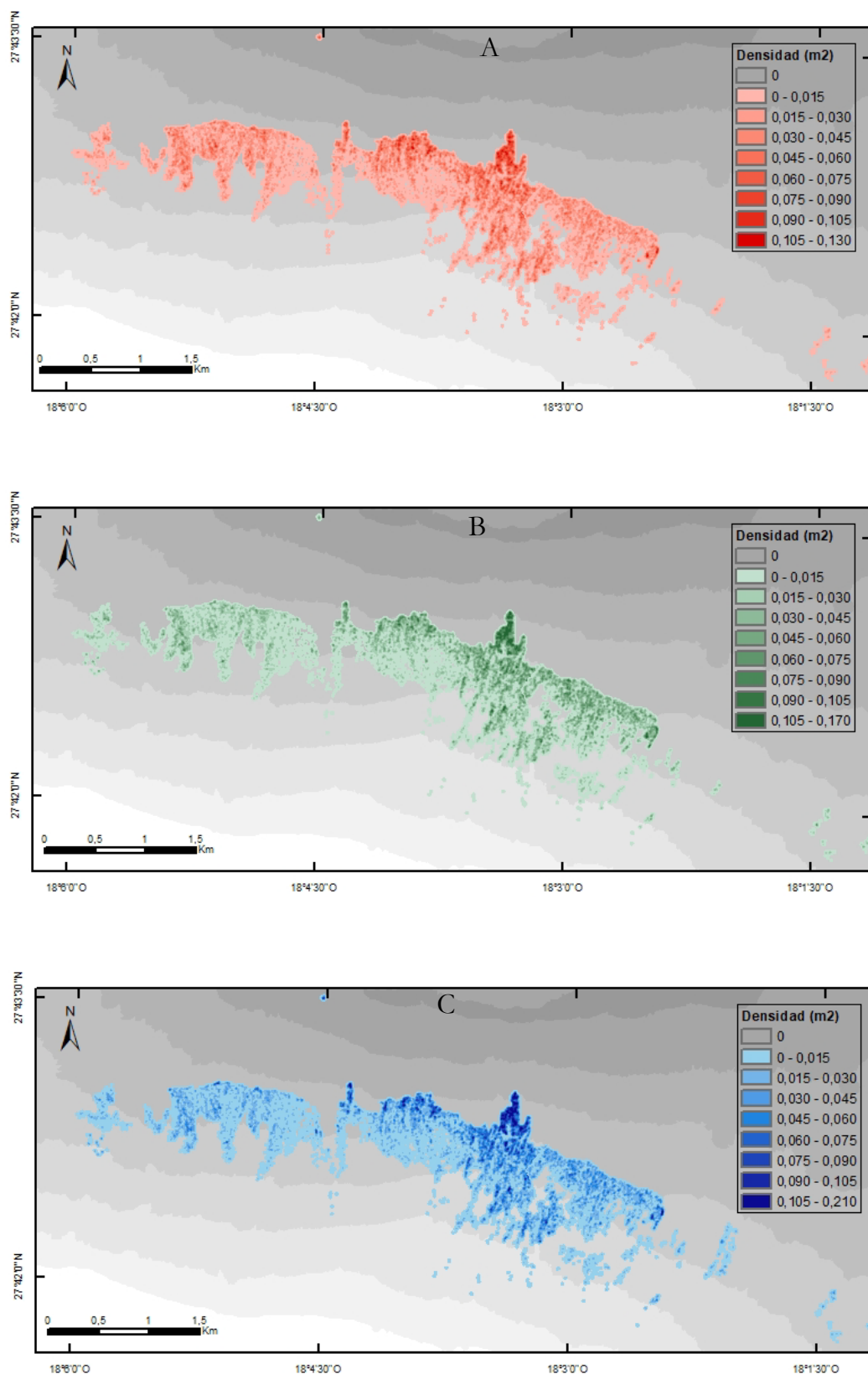


Figura 6.16. Densidad de *Juniperus turbinata* en El Julian según los índices de vegetación: (A) MSAVI, (B) MSR y (C) SAVI.

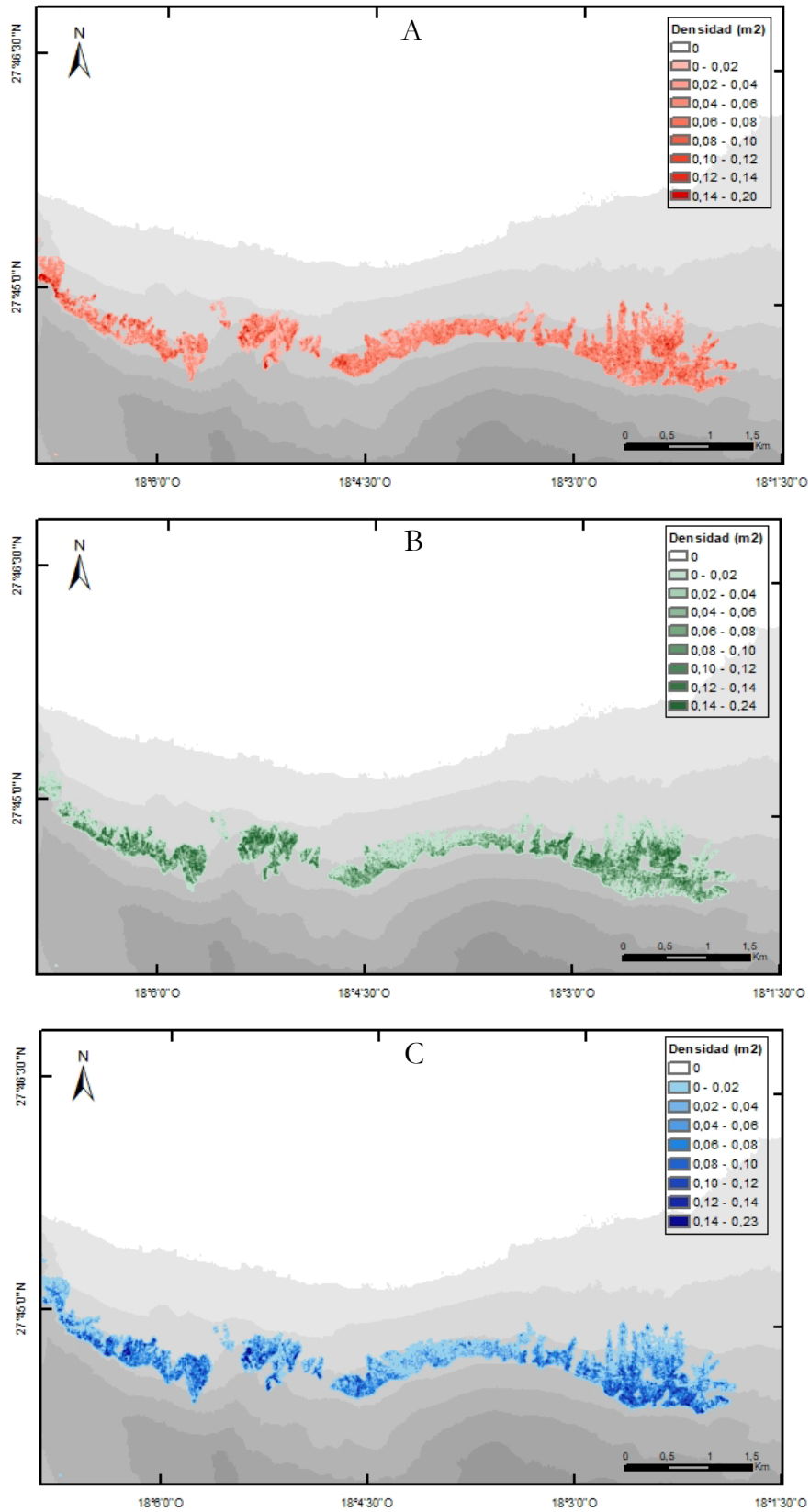


Figura 6.17. Densidad de *Juniperus turbinata* en Sabinosa según los índices de vegetación: (A) MSAVI, (B) MSR y (C) SAVI.

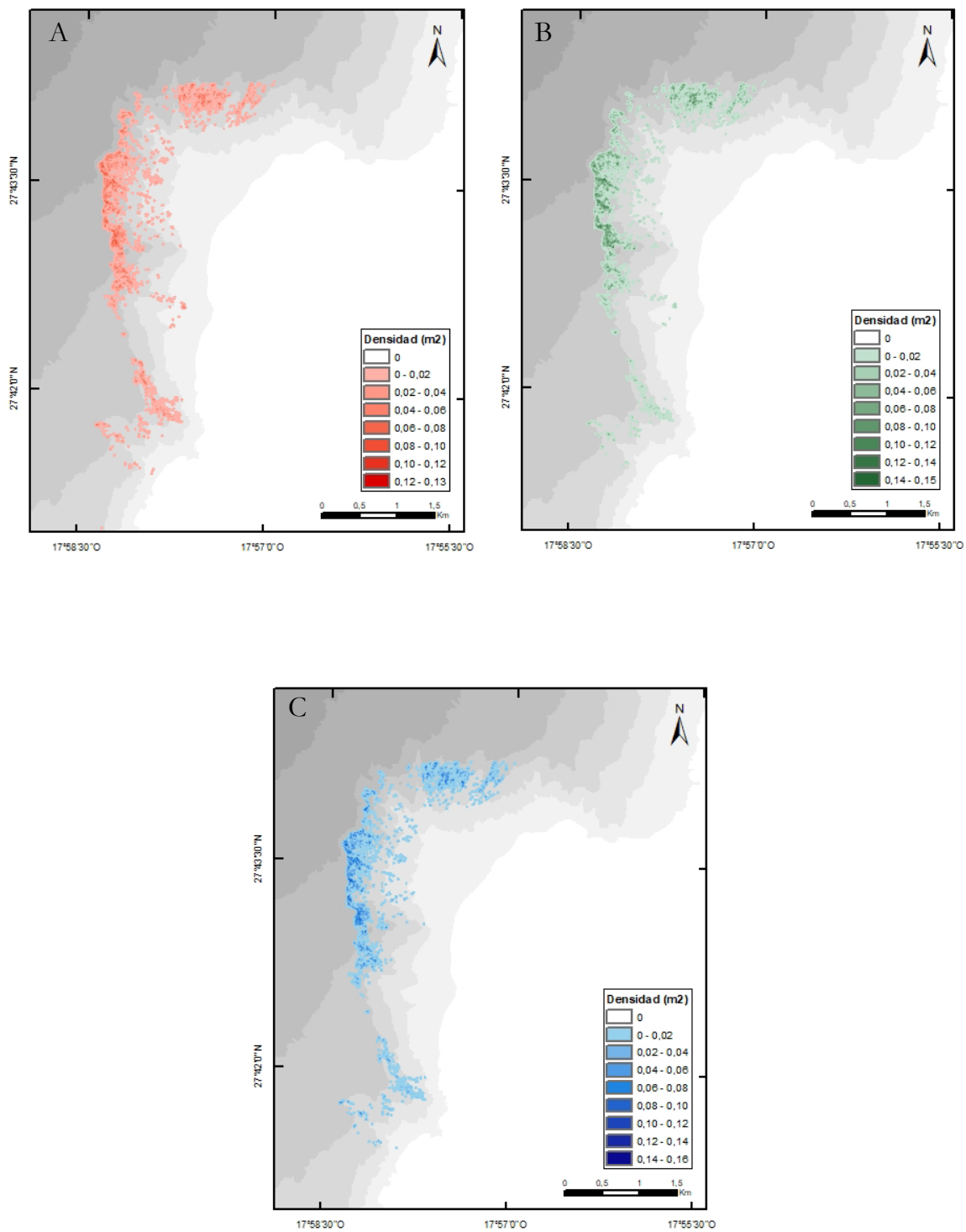


Figura 6.18. Densidad de *Juniperus turbinata* en Las Playas según los índices de vegetación: (A) MSAVI, (B) MSR y (C) SAVI.

La elevación representa una variable importante para los valores de densidad. En general, la densidad es mayor en la parte del sabinar con mayor cota, aunque no ocurre en la parte más oriental del sabinar húmedo. La expansión que se observa es un desarrollo a partir de centros más densos.

6.3. FIRMAS ESPECTRALES.

El conocimiento de los valores de la reflectividad en función de la longitud de onda proporciona información sobre parámetros que controlan la radiancia espectral. La caracterización de las especies vegetales puede ser determinada por la radiancia espectral, en el caso de las imágenes del satélite GeoEye-1 en el rango de 450 a 580 nm, de 655 a 690 nm y de 780 a 920 nm. Estos valores aportan datos sobre los componentes bioquímicos de las hojas (pigmentos, agua, etc.) y la estructura de la cubierta (LAI) (Jacquemoud *et al.*, 1995). Estos factores tienen mayor o menor importancia en función del tamaño del píxel, el tipo de cubierta y del rango de la longitud de onda (Asner, 1998). Según Zarco-Tejada *et al.*, (2001) para imágenes con una resolución inferior a 5 m las propiedades bioquímicas de las hojas y el LAI son los factores que caracterizan las firmas espectrales.

El estudio de firmas espectrales puede presentar inconvenientes, sobre todo cuando en una cobertura conviven especies con parecida similitud espectral. Además, hay que tener en cuenta la variabilidad de la especie a lo largo de las estaciones que modifican los valores de reflectividad. Otros factores que condicionan el resultado son la fecha concreta de la adquisición de las imágenes y la distancia entre el sensor y la cubierta vegetal (Milton *et al.*, 2009). En este estudio se caracteriza la especie a partir de los datos espectrales que proporcionan las imágenes de alta resolución del GeoEye-1. Se han seleccionado individuos con similar tamaño de copa y con un número suficiente para asegurar datos estadísticos. En este sentido, Jiménez y Díaz-Delgado (2015) recomiendan un mínimo de 30 individuos para medidas sobre el terreno. La diferenciación de *Juniperus turbinata* se obtiene a partir de las concentraciones de los pigmentos presentes hasta los 920 nm y del LAI que se observa en el espectro de reflectividades. Los resultados obtenidos hacen referencia a unas condiciones concretas (fecha, localización y geometría de la observación) y, por lo tanto, no son extrapolables.

El estudio se centra en La Dehesa y El Julan (sabinar seco), donde se pueden localizar fácilmente individuos aislados y en Sabinosa (sabinar húmedo). En los mapas del apartado anterior (figuras 6.3 a 6.14) se puede discriminar las sabinas a nivel de individuo cuando está aislado, como ocurre por ejemplo en zonas del sabinar seco, pero cuando forma bosque con fayas y brezos se ha delimitado la superficie de ocupación del bosque. Los valores medios de reflectividad, para las cuatro bandas (tabla 6.3), se han obtenido a partir de 177 puntos (91 de *Juniperus turbinata*, 45 de pino y 41 de laurisilva²) (figura 6.19). Los valores máximos corresponden a la sabina en el sabinar seco en las bandas 1, 2 y 3, y a la

laurisilva en la banda 4. La reflectividad obtenida con imágenes GeoEye-1 presenta los patrones de las curvas espectrales para vegetación, con alta reflectividad en el IRC (banda 4) y baja en el visible, en especial en el rojo (banda 3). Hay que tener presente que el sensor detecta una superficie, en este caso de 4 m² y no a escala de la hoja, por lo tanto, la forma de la hoja, la iluminación y la cobertura, influyen en los valores de reflectividad que caracterizan en este estudio al *Juniperus turbinata*. En el sabinar seco el valor medio de la reflectividad en el IRC es de 0,2037 y en el rojo de 0,03247, de donde se obtiene para el MSR un valor de 1,95, para el MSAVI de 0,31 y para el SAVI de 0,11. Excepto para el SAVI, los otros dos índices coinciden con los intervalos obtenidos a partir de un rango de reflectividades de los índices de vegetación (tabla 6.1).

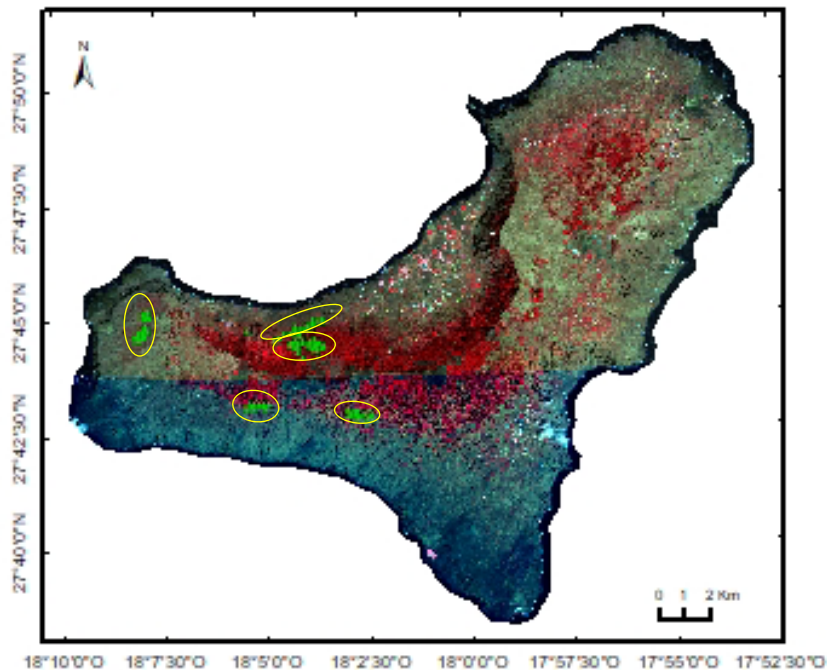


Figura 6.19. Localización de puntos de control sobre una composición 432.

Tabla 6.3. Valores medios de reflectividad para cada banda de cada una de las especies en los puntos de estudio.

Bandas	Reflectividad			
	S _s	S _H	P	L
1	0,04321	0,02987	0,02687	0,01313
2	0,04887	0,03485	0,04105	0,02412
3	0,03245	0,02296	0,02539	0,01508
4	0,20370	0,18710	0,24950	0,23570

S_s (sabina en el sabinar seco), S_H (sabina en el sabinar húmedo), P (pino), L (laurisilva).

² Se han tomado puntos en cotas propias de la laurisilva en el sabinar húmedo para discriminar con el fayal-brezal. Los puntos no corresponden a una especie específica de laurisilva.

Para el sabinar húmedo el valor medio en el IRC es de 0,1871 y en el rojo de 0,02296, obteniendo para el MSR un valor de 2,30, para el MSAVI de 0,30 y para el SAVI de 0,44. En este caso se obtiene una sobrestimación del valor medio de reflectividad para el MSAVI y el SAVI.

La curva espectral del *Juniperus turbinata* del sabinar seco presenta una absorción máxima en el rojo y en el azul (figura 6.20). Esta absorción en estas dos bandas es debido a una actividad clorofílica. La menor absorción en el visible se obtiene en el verde. En el sabinar húmedo también presenta un mínimo absoluto en el rojo y un máximo absoluto en el IRC, con valores inferiores de reflectividad con respecto al sabinar seco, debido a un mayor contenido de pigmentos, con una inflexión en el verde. El valor de reflectividad en el verde es sensiblemente mayor en las sabinas del sabinar húmedo. En consecuencia, en el sabinar húmedo la especie muestra mayor presencia de pigmentos en especial de clorofila en las bandas del visible con respecto a las sabinas presentes en el sabinar seco. El comportamiento del pino con sabinar seco muestra valores inferiores en el visible, pero superiores en el IRC. La laurisilva respecto a la sabinas en el sabinar húmedo presenta valores inferiores de reflectividad. Se han obtenido valores de reflectividad en el visible, menores en la laurisilva y mayores en el *Juniperus turbinata* en el sabinar seco, que están relacionados con la presencia de la clorofila y son debidos a las transiciones electrónicas. En el IRC, los mayores valores de reflectividad se dan en el pino canario, relacionados con la estructura celular de la hoja y se deben a transiciones de tipo rotacional.

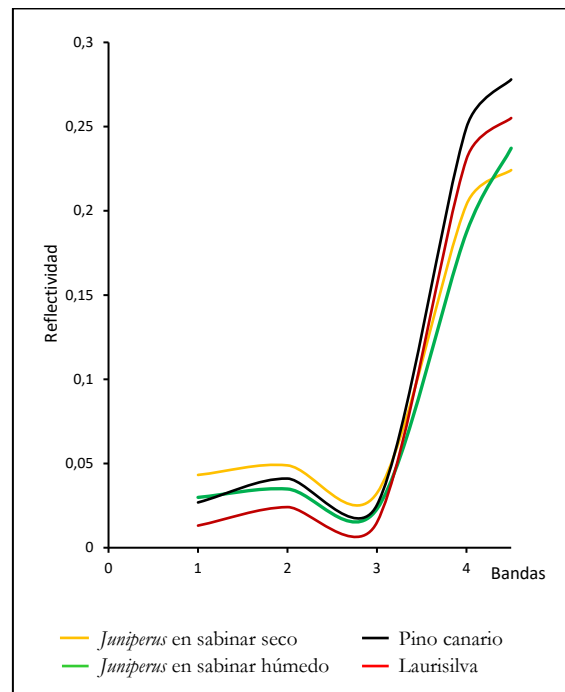


Figura 6.20. Valores medios de la reflectividad de B1, B2, B3 y B4 en los puntos de muestra.

El estudio de la primera derivada del espectro proporciona información sobre los pigmentos presentes en las hojas, ya que la radiación predominante del espectro visible proviene de la composición de las hojas situadas en la parte superior del dosel (Blackburn y Steele, 1999) siendo, por lo tanto, una metodología útil para distinguir las diferentes especies. Como el valor máximo que aportan las imágenes es de 920 nm y la variación del contenido de agua en las hojas se refleja en el rango 750-2.500 nm (Ceccato *et al.*, 2001), no se analiza en este apartado estos cambios. Para ello se ha realizado la interpolación de Lagrange, ya que se conocen los valores para obtener un polinomio de grado igual o inferior al número de puntos, de la siguiente forma:

$$P_n(x) = \sum_{i=0}^n f(x_i) \cdot L_i(x) \quad (i = 0, \dots, n)$$

donde,

$$L_i = \prod_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n \frac{x-x_j}{x_i-x_j} = \frac{x-x_0}{x_i-x_0} \dots \frac{x-x_n}{x_i-x_n}$$

Debido a que las imágenes proporcionadas por el GeoEye-1 no aportan información en el intervalo de los 580 a 655 nm (característico de la clorofila b) y de los 690 a 780 nm, se ha interpolado la función de ajuste.

Tabla 6.4. Valores medios de la derivada.

Bandas	Ss	S _H	P	L
1	0,4043	0,3720	0,5380	0,4829
2	0,4019	0,3700	0,5301	0,4774
3	0,4090	0,3747	0,5388	0,4819
4	0,3363	0,3120	0,4196	0,3786

Cuando se realiza la primera derivada de una función aparecen máximos donde son puntos de inflexión en la función a derivar, permitiendo visualizar de una manera más clara la zona entre el rojo y el IRC denominada límite rojo (Danson y Plummer, 1995; Gilbert *et al.*, 1996; Gitelson *et al.*, 1996), ya que es donde se localiza un punto de inflexión entre estas bandas.

El cálculo de la primera derivada de la función espectral (figura 6.21) presenta una diferenciación de las especies para el contenido de pigmentos. Al contrastar los valores del *Juniperus turbinata* en el sabinar seco con el pino, ya que hay zonas en las que coexisten, se observan diferencias, como ocurre en el análisis de reflectividad, con valores de 0,42 a 0,54 en el pino y 0,33 a 0,40 en la sabina. En cambio, entre la sabina del sabinar húmedo (0,31-0,37) y la laurisilva (0,38-0,48), aunque se observa diferencia, los valores son más similares, haciendo que la resolución que proporcionan las imágenes del satélite sea determinante en estas áreas con mayor densidad. Esto coincide con los resultados obtenidos en el apartado anterior, donde los rangos en el sabinar húmedo son más estrechos, tanto para el índice

MSR como para el MSAVI, en comparación con los obtenidos en el sabinar seco.

A partir de la curva de reflectividades se han delimitado los intervalos que caracterizan a la sabina en el sabinar seco y en el húmedo. Los resultados para las tres zonas (El Julan, La Dehesa y El Golfo) indican una mayor precisión en El Julan. En el caso del sabinar seco de La Dehesa la presencia de sotobosque (jara -*Cistus monspeliensis*-, tasaigo -*Rubia fruticosa*-, verode -*Kleinia nerifolia*- y tabaiba amarga -*Euphorbia lamarckii*-) interfiere en la determinación de un rango preciso, y en el sabinar húmedo de El Golfo, la formación de agrupaciones de bosques con laurisilva o fayal-brezal dificulta el poder discriminar a nivel de individuo a partir de imágenes de satélite, aunque sean de muy alta resolución. En la zona de El Julan la distribución del sabinar seco forma entidad de bosque muy dispersa ya que no hay otras especies arbóreas a parte del *Juniperus turbinata*, facilitando la caracterización de los valores de la sabina.

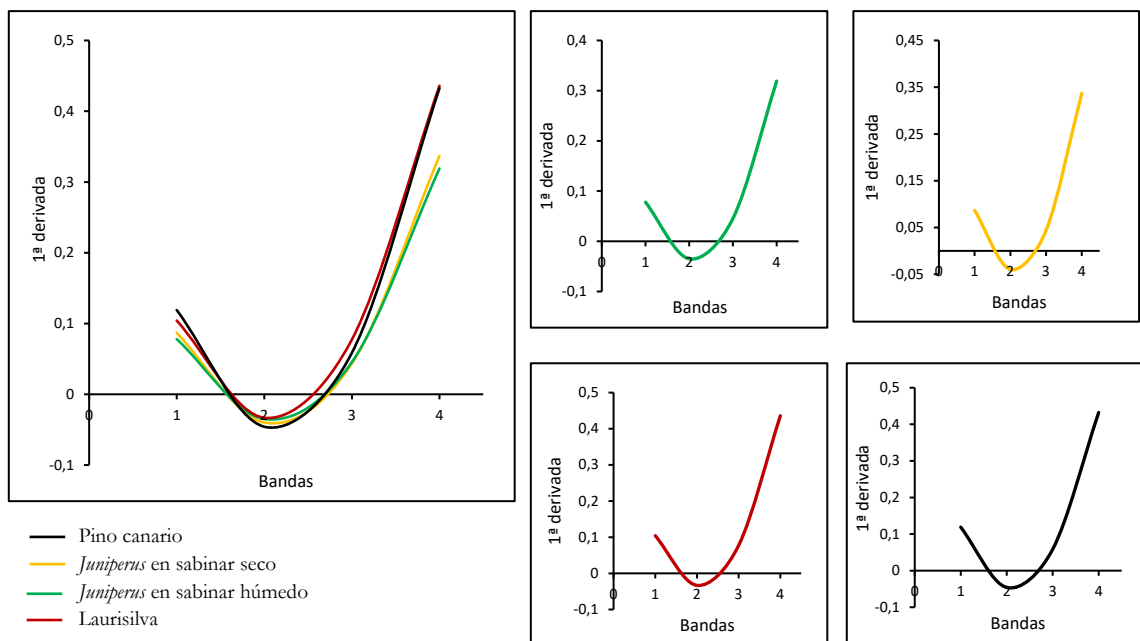


Figura 6.21. Primera derivada del espectro de reflectividades.

La localización de *Juniperus turbinata* según el sabinar no presenta grandes diferencias en el espectro de reflectividades, pero sí se observan en el espectro de la primera derivada, relacionado con los pigmentos de las hojas. Estas diferencias son más significativas al compararlo con otras especies, la laurisilva y el pino. Por lo tanto, las propiedades de absorción por parte de los pigmentos de las hojas en el rango 750-920 nm, proporciona información de la diferenciación de las especies y en consecuencia la delimitación de estas especies, sobre todo del pino y la laurisilva con respecto a la sabina, presentando un máximo en la función derivada (máxima absortividad) que corresponde a 690 nm. La diferencia de los valores de reflectividad es muy pequeña, lo que hace que sea necesaria el

uso de imágenes de muy alta resolución para reducir la superposición de las características espectrales. Los cambios de los valores obtenidos en los puntos de control pueden proporcionar información en posteriores estudios temporales del estado de los árboles y la posible evolución del sabinar.

6.4. VALIDACIÓN A PARTIR DE LA DENSIDAD.

Como se ha establecido anteriormente, los índices de vegetación son una importante herramienta para determinar la cantidad de vegetación de una cubierta, en este caso, a partir del índice de área foliar y la fracción de cobertura vegetal. Además, nos permiten delimitar la superficie de una determinada especie a partir de imágenes de muy alta resolución en terrenos con variabilidad vegetal. En este apartado se comparan los índices de vegetación a partir de los valores de densidad de *Juniperus turbinata* y con el índice TRVI³ propuesto por Fadaei *et al.* (2012) para bosques de *Juniperus excelsa* con imágenes de alta resolución (ALOS). Mediante una regresión lineal entre los índices de vegetación y la densidad de árboles se validan los índices.

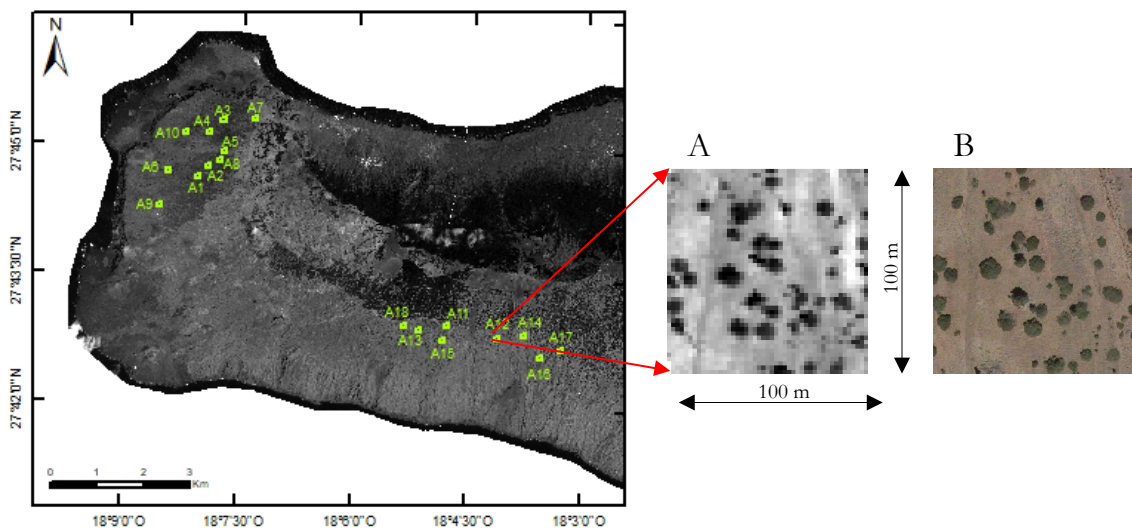


Figura 6.22. Localización de las zonas de una hectárea donde se ha determinado la densidad. (A) Detalle de la zona A12 de la banda 3 y (B) de la ortofotografía.

Se han delimitado 18 zonas de una hectárea cada una, equivalente a 2.500 píxeles por zona, en La Dehesa (10) y en El Julan (8) distribuidas de manera aleatoria (figura 6.22) y se han

³ *Total Ratio Vegetation Index*. Índice propuesto para regiones áridas y semiáridas basado en el espectro de longitudes de onda multiespectrales.

$$TRVI = 4 \cdot \left(\frac{\rho_{IRC} - \rho_R}{\rho_{IRC} + \rho_R + \rho_V + \rho_A} \right)$$

donde ρ_{IRC} , ρ_R , ρ_V y ρ_A son las reflectividades de las bandas del infrarrojo cercano, el rojo, el verde y el azul.

calculado los índices MSAVI, MSR y TRVI, y la densidad de árboles a partir de las imágenes de satélite (tabla 6.5). Las áreas A5, A6, A7, A9 y A10 corresponden a zonas de La Dehesa donde predominan las sabinas en la cobertura vegetal y de A11 a A18 en El Julan. Se han obtenido resultados de cada zona por separado, debido a que en La Dehesa los índices de vegetación se ven afectados por otras especies vegetales, mientras que en El Julan la cubierta vegetal en las áreas en estudio es únicamente de sabinas. De las áreas seleccionadas en La Dehesa la densidad es muy heterogénea, con valores que van desde los 50 árboles/ha hasta los 6 árboles/ha, con una densidad media de 21,8. En la zona de El Julan se aprecia mayor densidad, variando de 80 a 27 árboles/ha, con una media de 41,1.

Tabla 6.5. Densidad de *Juniperus turbinata* (árboles/ha) (D), valores máximos de reflectividades (Máx.), valores mínimos de reflectividades (Mín.), media (M) y desviación estándar (SD) en las parcelas de control. De A1 a A10 corresponde a La Dehesa y de A11 a A18 a El Julan.

	D	MSR				MSAVI				TRVI			
		Máx.	Mín.	M.	SD	Máx.	Mín.	M.	SD	Máx.	Mín.	M.	SD
A1	15	1,99	0,30	0,83	0,27	0,32	0,04	0,13	0,04	2,13	0,49	1,08	0,27
A2	29	2,09	0,36	0,86	0,28	0,31	0,05	0,14	0,03	2,20	0,51	1,12	0,28
A3	30	2,50	0,33	0,99	0,35	0,38	0,06	0,15	0,05	2,36	0,50	1,24	0,33
A4	8	2,00	0,30	0,81	0,26	0,29	0,04	0,13	0,03	2,09	0,43	1,06	0,28
A5	6	2,01	0,20	0,55	0,37	0,31	0,03	0,09	0,05	2,10	-0,01	0,73	0,44
A6	26	1,76	0,20	0,56	0,25	0,29	0,03	0,09	0,03	1,92	0,21	0,75	0,28
A7	50	2,27	0,20	0,57	0,34	0,37	0,03	0,10	0,04	2,29	0,24	0,78	0,35
A8	21	2,12	0,20	0,82	0,32	0,28	0,03	0,12	0,03	2,18	0,27	1,07	0,33
A9	6	1,66	0,20	0,39	0,17	0,29	0,03	0,07	0,03	1,87	0,11	0,56	0,20
A10	27	2,07	0,24	0,60	0,26	0,32	0,03	0,10	0,04	2,16	0,34	0,80	0,29
A11	42	1,91	0,24	0,53	0,26	0,33	0,04	0,11	0,04	2,19	0,38	0,80	0,30
A12	64	2,81	0,20	0,59	0,35	0,44	0,04	0,12	0,05	2,67	0,29	0,86	0,39
A13	80	2,11	0,20	0,71	0,34	0,34	0,04	0,14	0,05	2,24	0,32	1,01	0,39
A14	33	2,92	0,21	0,60	0,37	0,46	0,04	0,09	0,02	2,71	0,34	0,88	0,40
A15	45	2,00	0,20	0,53	0,28	0,36	0,04	0,10	0,04	2,18	0,25	0,80	0,35
A16	27	2,63	0,20	0,54	0,33	0,47	0,04	0,11	0,06	2,52	0,07	0,85	0,42
A17	32	2,94	0,20	0,82	0,55	0,52	0,04	0,16	0,09	2,81	0,13	1,13	0,56
A18	47	2,30	0,20	0,65	0,36	0,37	0,04	0,12	0,05	2,43	0,30	0,90	0,39

En los tres índices de vegetación, la regresión lineal entre la densidad y la media, ha sido positiva. En todos los casos, la regresión lineal presenta menor pendiente en La Dehesa (figura 6.23 D, E, F), lo que indica que los valores de densidad son más variados, en cambio, en El Julan la densidad es más homogénea (figura 6.23 A, B, C). En áreas con baja densidad (A4), los valores del índice de vegetación pueden ser mayores debido a la presencia de sotobosque.

Los índices TRVI y MSR presentan mayor sensibilidad, con un mayor gradiente de reflectividades. Los valores del TRVI son más altos en todas las parcelas de estudio. En contraste con los resultados de Fadaei *et al.* (2012) donde obtiene mejor coeficiente de

determinación para el índice TRVI frente al MSAVI, en este estudio es el MSAVI el que presenta mejor resultado con un mayor valor. En La Dehesa, con sabinares más dispersos (menor densidad), se produce un menor ajuste de la regresión lineal. En cambio, en El Julan el rango de la reflectividad es menor. Los tres índices presentan una similar distribución entre el índice de vegetación y la densidad, siendo el MSR el que presenta un mejor ajuste en El Julan y el MSAVI en La Dehesa.

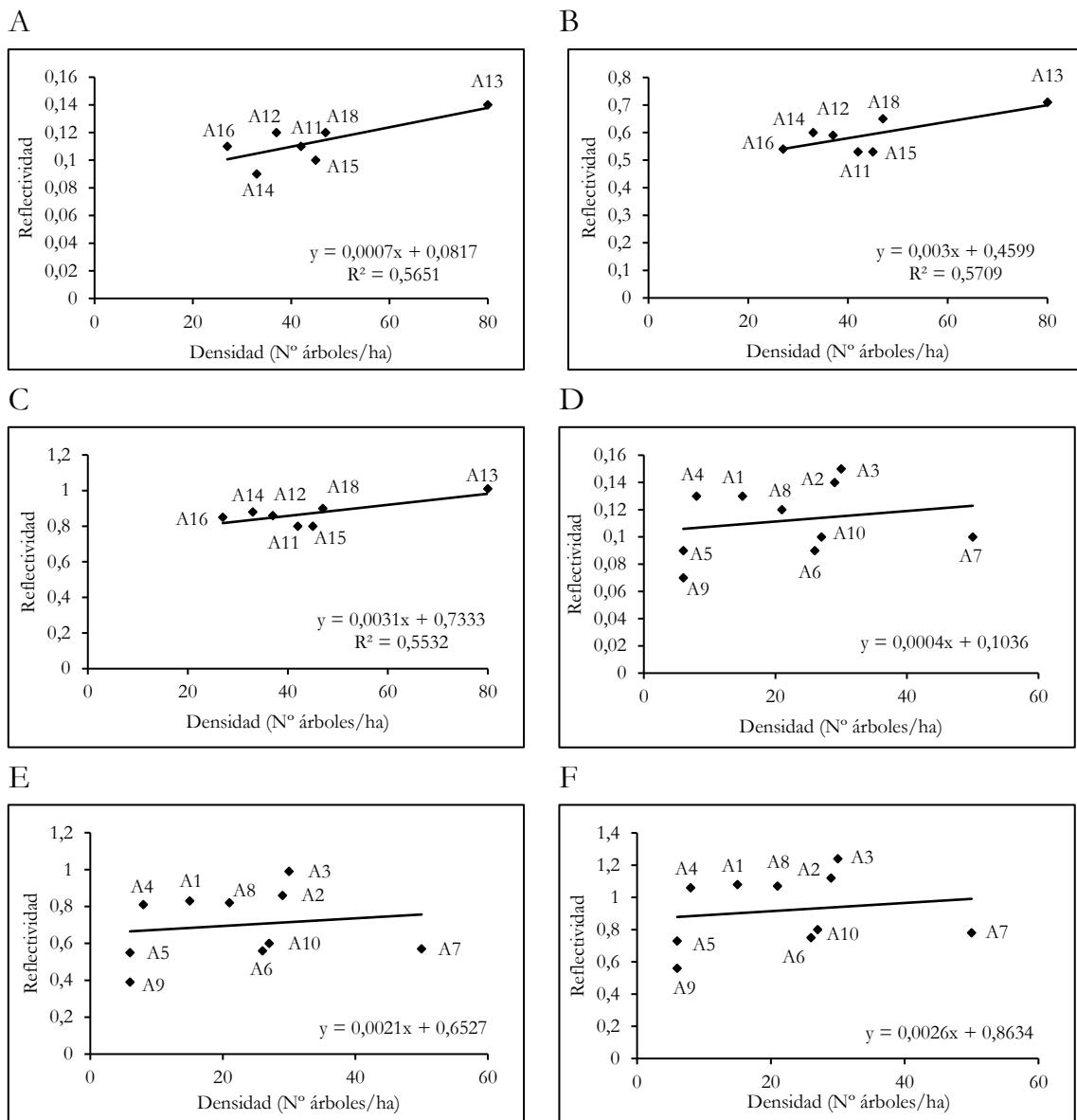


Figura 6.23. Regresión lineal entre la densidad de *Juniperus turbinata* y los índices de vegetación: (A) MSAVI en El Julan, (B) MSR en El Julan, (C) TRVI en El Julan, (D) MSAVI en La Dehesa, (E) MSR en La Dehesa, (F) TRVI en La Dehesa.

6.5. COMPARATIVA.

Los resultados obtenidos de la distribución de la sabina en función del rango representativo de reflectividades se muestran en las figuras 6.24 a 6.28. Se observa que, en el sabinar seco, donde los individuos tienen una distribución aislada se puede discriminar, pero donde no hay una distancia superior a la propia copa se ha delimitado la superficie del bosque. Las imágenes muestran la distribución en cada sabinar. Los índices SAVI y MSAVI muestran una menor ocupación por parte del *Juniperus turbinata* (tabla 6.6), en cambio el índice MSR presenta valores superiores. En el área del sabinar seco con pinos es donde hay mayor diferencia entre los índices, presentando el MSR el mayor valor y el MSAVI y el SAVI valores similares. En general, podemos observar la diferencia entre la concentración de *Juniperus turbinata* en los tres sabinares en función del índice de vegetación, y en los tres casos se observa una importante diferencia entre la parte seca y la húmeda, como se demostró en el apartado anterior. La diferencia en el sabinar húmedo con respecto al MSR ya que es el índice con mayor ocupación, presenta un 0,13% menos para el MSAVI y del 1,22% para el SAVI. En el sabinar seco la diferencia es de 1,43% tanto para el MSAVI como para el SAVI. En el sabinar seco con pinos es del 1,46% y 1,34% con respecto al MSAVI y SAVI.

Tabla 6.6. Distribución de sabinas (%) en función del método utilizado para determinar el intervalo de reflectividades en el sabinar seco (S_s), húmedo (S_h) y con pinos (S_p).

	Rango			Firmas	
	MSR	MSAVI	SAVI	MSR	MSAVI
S _s	6,80	6,67	5,58	4,88	5,11
S _h	17,95	16,52	16,52	15,77	13,46
S _p	5,10	3,64	3,76	2,19	5,09

A partir de los valores de ocupación calculados se ha determinado la superficie total de la sabina (tabla 6.7).

Tabla 6.7. Superficie (ha) de *Juniperus turbinata* en función del sabinar y del modelo. Distribución de sabinas (%) respecto al total del sabinar.

	Rango			Firmas	
	MSR	MSAVI	SAVI	MSR	MSAVI
S _s	39,94	37,99	32,28	26,97	30,00
S _h	45,39	42,12	42,12	32,15	34,30
S _p	15,55	12,55	12,94	6,23	24,03
Total	100,88	92,66	87,34	65,35	88,33
Dist.	8,53	7,84	7,39	5,53	7,47

Los valores obtenidos a partir de intervalos de reflectividad calculados con la firma del *Juniperus turbinata* tanto para el sabinar seco como el húmedo, muestran valores muy inferiores respecto al caso anterior, excepto en el MSAVI en Las Playas. Esta diferencia es más acusada en el caso del MSR. Esto indica que hay una subestimación para la firma espectral del *Juniperus turbinata* tanto en el sabinar seco como en el húmedo y con respecto a la laurisilva, con la excepción del índice MSAVI cuando coexiste con pinos donde se obtienen unos valores superiores.

Analizando los datos obtenidos a partir de un rango representativo de reflectividades se observa que el índice SAVI muestra una menor superficie de sabina debido a un menor valor para el sabinar seco. A pesar de la constante (L) que incorpora el SAVI para coberturas poco densas como el sabinar seco, los valores de reflectividad están influenciados por el suelo, presentando una menor superficie para el índice de vegetación MSAVI, sobre todo en la zona de El Julan y La Dehesa. Respecto al total del sabinar de la isla (1.182 ha), el valor del índice MSR es del 8,53%, del MSAVI es del 7,84% y del SAVI es del 7,39%. Respecto a los valores a partir de la firma espectral, los índices subestiman la superficie de sabina, excepto en el sabinar con pinos para el MSAVI donde hay una sobreestimación. Es en este sabinar donde los resultados son más heterogéneos. Comparando la distribución total entre los dos métodos, a partir de un rango representativo de reflectividades se obtiene un 3% más para el MSR (35,53 ha) y un 0,37% más para el MSAVI (4,33 ha).

Referente a la presencia de sabina en función de la altitud, en el sabinar húmedo se encuentra entre los 400 y 600 m en la parte central y occidental, mientras que en la zona oriental se localizan entre los 250 y 750 m, aunque mayoritariamente entre los 400 y 750 m (figuras 6.24 a 6.28). En cotas bajas es el índice MSAVI el que detecta más sabinas, y en las más altas son el SAVI y el MSAVI. En el sabinar seco de La Dehesa, la presencia de sabina en general está entre los 450 y 650 m, mientras que en El Julan se extiende a cotas superiores, con una presencia mayoritaria entre los 800 y 950 m en la parte occidental (aunque también se encuentra en menor medida a partir de los 650 m) y con un rango más amplio en la parte oriental, siendo entre los 450 y 1.000 m. En el sabinar seco con presencia de pinos, se localizan *Juniperus turbinata* entre los 600 y 850 m, siendo en cotas superiores en la zona de Las Playas.

En los tres índices el valor de la sabina respecto a la superficie total de sabinar es similar, variando el porcentaje en función del tipo de sabinar. Estos valores representan una ocupación de *Juniperus turbinata* muy inferior a la superficie del sabinar y a su potencial área de ocupación, como referencian otros autores a partir de datos climáticos (Del Arco *et al.*, 2006; Salvà-Catarineu *et al.*, 2014a). La comprobación visual sobre el terreno en las zonas accesibles constata esta conclusión.

El análisis de los resultados referentes a la distribución (figuras 6.24 a 6.28) confirma el crecimiento aislado de la sabina. Estos resultados son un indicador del estado de la sabina y constituyen valores previos a la elaboración de series temporales, pudiendo detectar las variaciones producidas en la cubierta vegetal debidas a la influencia antrópica o a cambios ambientales. A diferencia de García *et al.* (2014) que utiliza ortofotografías y aplica técnicas de interpolación para determinar las tendencias demográficas de *Juniperus phoenicea* subsp. *turbinata*, en esta tesis se han obtenido resultados de distribución de sabina a partir de imágenes de satélite de alta resolución y de los índices de vegetación que mejor se ajustan a la cobertura de la sabina.

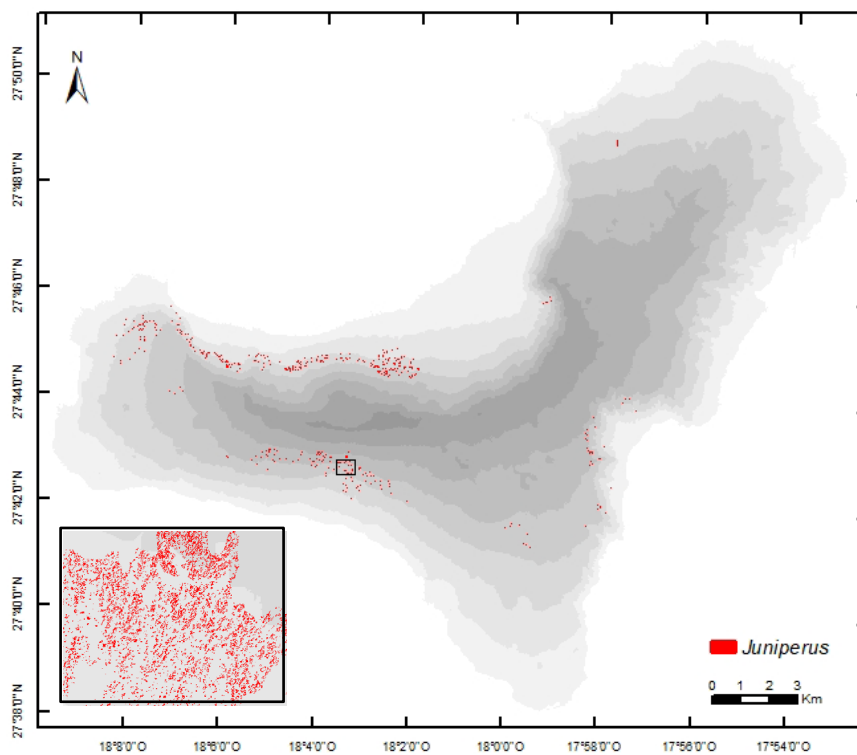


Figura 6.24. Cartografía de las sabinas en El Hierro obtenida con el índice MSAVI a partir de un rango representativo de reflectividades.

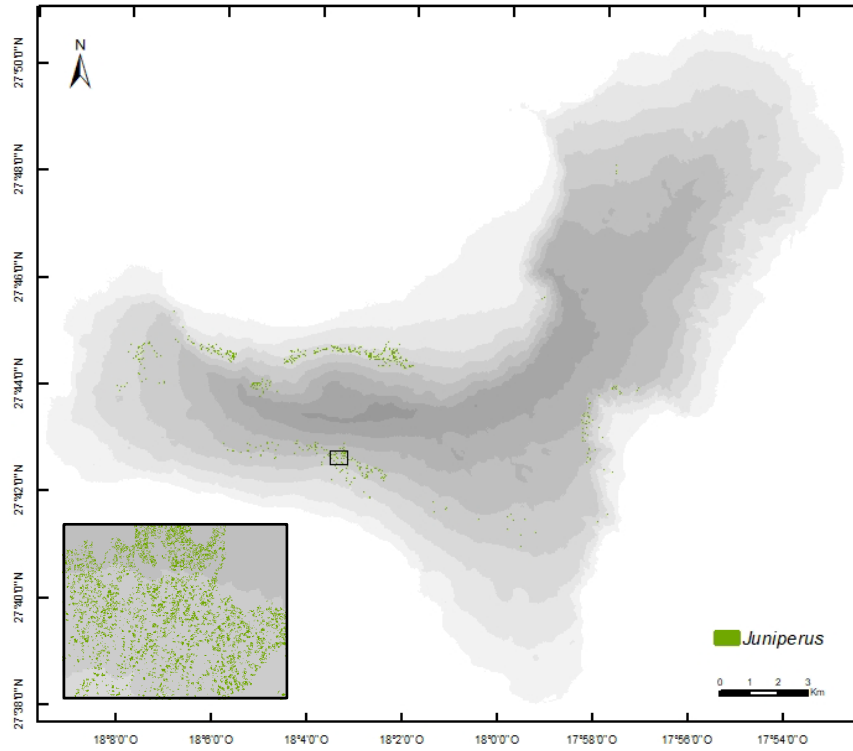


Figura 6.25. Cartografía de las sabinas en El Hierro obtenida con el índice MSR a partir de un rango representativo de reflectividades.

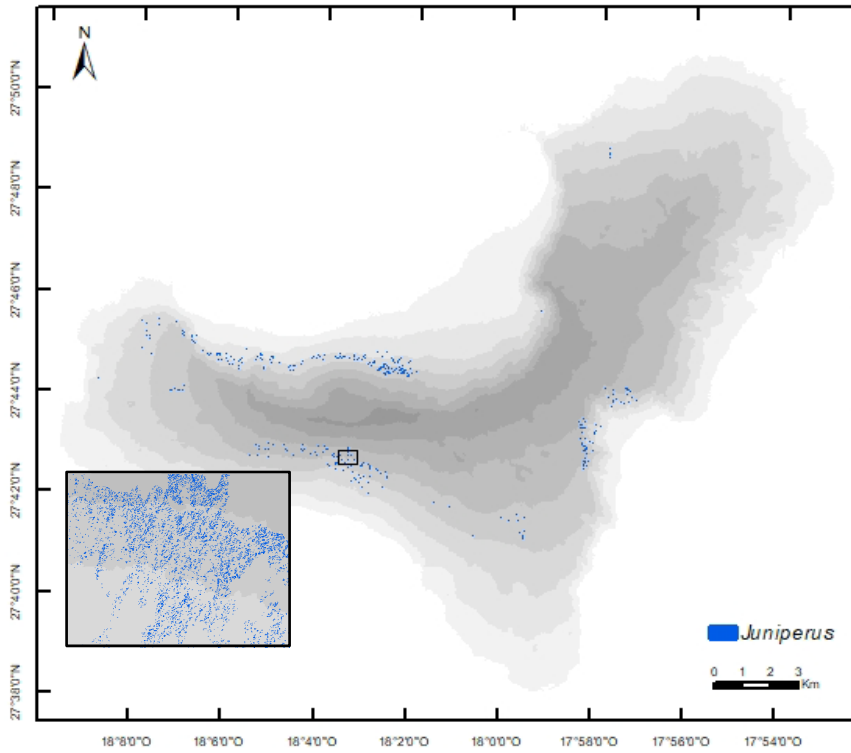


Figura 6.26. Cartografía de las sabinas en El Hierro obtenida con el índice SAVI a partir de un rango representativo de reflectividades.

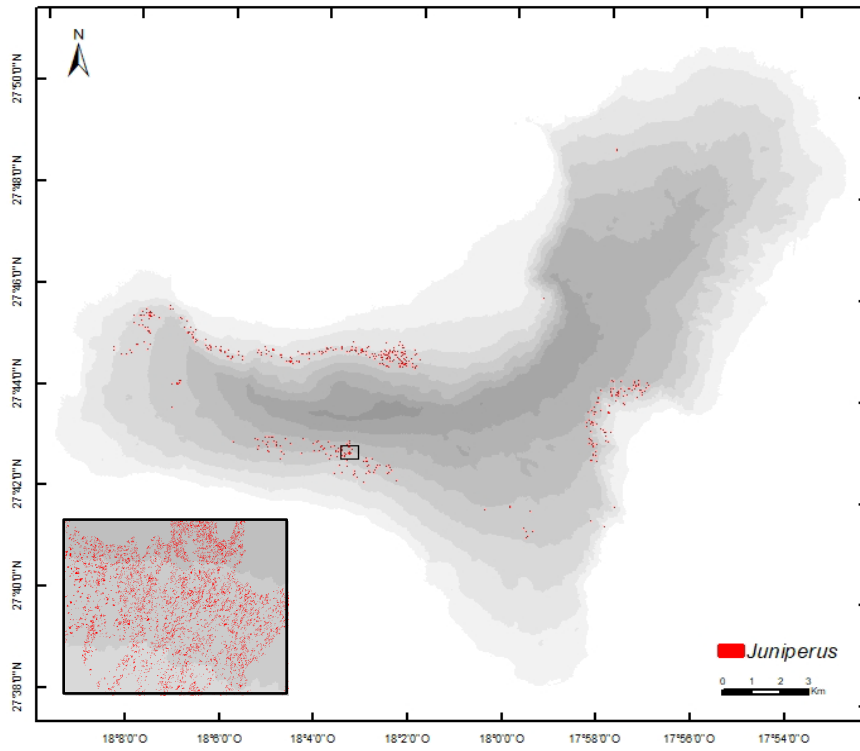


Figura 6.27. Cartografía de las sabinas en El Hierro obtenida con el índice MSAVI a partir de la firma espectral de imágenes GeoEye-1.

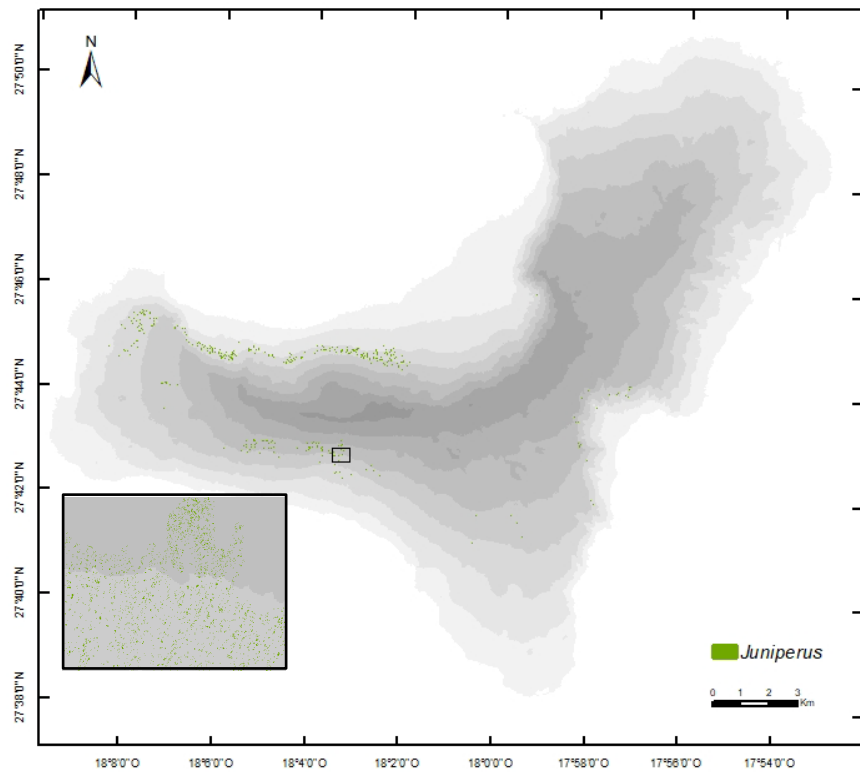


Figura 6.28. Cartografía de las sabinas en El Hierro obtenida con el índice MSR a partir de la firma espectral de imágenes GeoEye-1.

Se han seleccionado ocho zonas (apartado 6.4), cuatro en La Dehesa y cuatro en El Julan, como muestras aleatorias independientes para la validación de la cartografía de la sabina mediante los índices MSAVI y MSR. Las zonas seleccionadas no presentan interacción con otras especies, las sabinas se muestran de forma dispersa y se pueden diferenciar individuos. La validación a partir de resultados obtenidos para los índices MSAVI y MSR se presenta en la tabla 6.8.

Tabla 6.8. Densidad (nº de sabinas/hectárea) y porcentaje de coincidencia (C) para los índices de vegetación MSAVI y MSR.

		D	MSAVI	C(%)	MSR	C(%)
La Dehesa	A2	29	35	79,3	40	62,1
	A6	26	21	80,8	21	80,8
	A9	6	5	83,3	5	83,3
	A10	27	23	85,2	24	88,9
El Julan	A11	42	46	90,5	36	85,7
	A12	64	60	93,7	47	73,4
	A14	42	44	95,2	39	92,8
	A15	47	52	89,4	49	95,7

Referente a la densidad en La Dehesa el MSR presenta valores superiores en la mayoría de las áreas de referencia. En El Julan es el MSAVI el que muestra valores superiores.

Se ha determinado el grado de coincidencia a partir del error relativo ($C=1-Er$). En la zona de El Julan el índice MSAVI presenta mejores resultados en casi todas las zonas con un porcentaje de coincidencia superior, en cambio en La Dehesa los dos índices muestran valores similares. Los valores mínimos se obtienen en la zona A2 de La Dehesa, siendo el índice MSR el que presenta el mínimo absoluto. Comparando el grado de coincidencia entre El Julan y La Dehesa, el índice MSAVI presenta valores superiores en todas las zonas de muestreo de El Julan. El índice MSR muestra valores superiores en tres de las zonas de El Julan.

7. CONCLUSIONES FINAL REMARKS

“Cada día sabemos más y entendemos menos”.

Albert Einstein.

El estudio de la sabina en El Hierro que se presenta en esta tesis permite generar una referencia para conocer su evolución en posteriores estudios, permitiendo elaborar estrategias de gestión para su conservación y regeneración. La importancia del endemismo mediterráneo-macaronésico *Juniperus turbinata* subsp. *canariensis* viene avalada por la declaración de reserva de la biosfera por la UNESCO y la de especie protegida por la CEE.

En esta tesis se han analizado los índices que mejor determinan la situación de la sabina de manera específica para El Hierro, teniendo especial atención en factores propios de la isla como el relieve y el clima. La utilización de imágenes GeoEye-1 ha permitido investigar la población actual de *Juniperus*. En todo el proceso la aplicación de sistemas SIG ha sido fundamental.

En este capítulo se analizan los objetivos específicos que se enumeran en el capítulo 1 (Introducción) y que han constituido la investigación en El Hierro.

Generar imágenes con corrección geométrica y radiométrica.

Las imágenes del satélite GeoEye-1 utilizadas en esta tesis están afectadas por distorsiones producidas en su obtención. Para minimizar sus efectos se han corregido tanto desde el aspecto geométrico como radiométrico. La asignación de coordenadas cartográficas a los píxeles de los datos originales de la imagen se ha realizado mediante la obtención de puntos de control. La precisión y calidad de este proceso ha sido clave ya que influye en las siguientes fases del tratamiento de las imágenes, obteniéndose mejores resultados en las zonas con menor pendiente. Las características climáticas de la isla con la presencia casi permanente de nubes en el norte han determinado una selección exhaustiva de las imágenes para minimizar la influencia de la atmósfera. El método del objeto oscuro ha permitido reducir los efectos de los gases y partículas en suspensión que se encuentran en la atmósfera. La morfología de la isla con fuertes gradientes altitudinales produce zonas con sombra orográfica profunda con lo que el proceso de corrección topográfico ha sido laborioso. De los dos métodos analizados, el modelo de corrección C presenta los mejores resultados consiguiendo una mejor homogeneización entre las zonas más y menos iluminadas. Los resultados pueden ser útiles en estudios posteriores de El Hierro que requieran de imágenes de alta resolución.

Analizar diversos índices de vegetación en los sabinares.

Se han calculado nueve índices de vegetación y se han validado los resultados. La aplicación de parámetros biofísicos como el índice de área foliar y la fracción de cobertura vegetal demuestran que el MSAVI, el MSR y el SAVI, describen mejor la cubierta vegetal en los sabinares, con valores más altos del coeficiente de determinación. Cuando se ha

determinado la eficacia de los índices a partir del coeficiente de Leprieur, el *Range Error Ratio* y el *Noise Equivalent*, se observó que el MSAVI y el MSR presentaban mejores resultados, siendo los más adecuados para la identificación de la sabina en el área de estudio.

Establecer diferencias espectrales a partir de la detección remota.

A partir de puntos de control en las imágenes GeoEye-1 para la laurisilva, el pino y el *Juniperus turbinata* en el sabinar seco y el húmedo, se han obtenido valores de reflectividad para discriminar las especies. Estos valores son propios para la fecha de adquisición de las imágenes debido a la variabilidad estacional de las especies. La curva obtenida es característica de la vegetación presentando un fuerte contraste entre la banda 3 y la 4. Se ha podido diferenciar el *Juniperus turbinata* del sabinar seco y con el del húmedo, presentando en el primer caso valores superiores de reflectividad debido a un menor contenido de pigmentos. La primera derivada de la curva espectral ha proporcionado datos de las propiedades bioquímicas y ha confirmado la mayor presencia de clorofila en la sabina del sabinar húmedo. Se han comparado las curvas de la primera derivada para el contenido de pigmentos entre el pino y el *Juniperus turbinata* de la zona seca. El rango espectral de las imágenes GeoEye-1 con un máximo en los 1.200 nm no permite obtener valores sobre el contenido de agua. Entre la laurisilva y el *Juniperus* de la parte húmeda, aunque sí se aprecia diferencia, los rangos de reflectividad son más parecidos, presentando la máxima absorción en los 690 nm. Los intervalos de reflectividad han permitido discriminar de manera más precisa la sabina en el sabinar seco que en el húmedo.

Evaluar la eficacia de las imágenes del GeoEye-1 para discriminar especies.

Desde la primera fase en la corrección geométrica, la alta resolución que presentan las imágenes GeoEye-1, ha permitido una mayor minimización de las distorsiones geométricas. Además, esta resolución permite emplear polinomios de segundo y tercer grado en la corrección topográfica. Las imágenes resultantes aseguran una mayor precisión en las siguientes fases. Varios aspectos dificultan la localización de sabinas a partir de imágenes de satélite: 1) la misma especie presenta diferentes valores de reflectividad debido a los diferentes tamaños y a su estado, haciendo que los límites de los rangos de reflectividad varíen y se confundan con otras especies, 2) la sombra de las copas y 3) el compartir cobertura en el sabinar con otras especies, ya sean árboles o matorrales. Con una resolución de 2 m y 11 bits se han podido ajustar los rangos de reflectividad a partir de los índices de vegetación. Esta resolución ha permitido localizar sabina en sitios inaccesibles, diferenciar a individuos aislados en el sabinar seco y delimitar el sabinar en las zonas donde hay variabilidad vegetal formando bosques. Con estos resultados se ha obtenido la densidad en parcelas de referencia para comparar los índices de vegetación, confirmando que los índices MSR y MSAVI son los que proporcionan mejores resultados.

Determinar la densidad en función de las características propias de cada sabinar.

Para el rango obtenido que caracteriza al *Juniperus turbinata* para cada tipo de sabinar se ha calculado su superficie. En el sabinar seco el índice MSR presenta una mayor superficie de sabina (6,80%) y el SAVI la menor (5,58%), con un valor intermedio para el MSAVI (6,67%). Tanto en el sabinar húmedo como en el sabinar con pinos, el MSAVI y el SAVI presentan valores similares y el máximo corresponde al MSR. Los valores obtenidos constatan una superficie mucho mayor en las zonas húmedas, siendo superiores entre 2,5 a 4,5 los valores del sabinar seco y del sabinar con pinos, donde con el fayal-brezal y la laurisilva forma bosque. En las zonas más abruptas la localización de sabinas queda determinada por los resultados de corrección geométrica, pero no la cuantificación de la superficie de ocupación. La mayor densidad de *Juniperus turbinata* se encuentra en El Golfo (sabinar húmedo), mientras que La Dehesa (sabinar seco), El Julan (sabinar seco) y Las Playas (sabinar con pinos) presentan menor densidad. Para los tres índices de vegetación seleccionados (MSAVI, MSR y SAVI) el sabinar húmedo es el que presenta mayor superficie con mayor densidad. Los valores obtenidos del espectro característico de cada especie muestran valores muy inferiores a los observados por Del Arco *et al.* (2006) en el sabinar seco y en el sabinar con pinos. Los resultados que se han obtenido confirman que la ocupación es muy inferior a la superficie potencial en los sabinares, siendo del 8,53% para el MSR, del 7,84% para el MSAVI y del 7,39% para el SAVI. Factores antrópicos y ambientales han influido en la extensión de las sabinas.

Generar un mapa que muestre la distribución y abundancia de la sabina.

Los resultados anteriores (figuras 6.15 a 6.18) permiten realizar mapas de distribución y densidad para los índices de vegetación que mejor reflejan la cobertura vegetal, mostrando en La Dehesa, El Julan y Las Playas, una menor extensión y mayor en El Golfo. También se observa el tipo de distribución, siendo más dispersa en el sabinar seco. Esta distribución dispersa en el sabinar seco y con el fayal-brezal y la laurisilva en el sabinar húmedo, queda confirmada con los datos de campo de temperatura y humedad del aire y el suelo. La cartografía obtenida en esta tesis permite tener una base para poder comparar en posteriores estudios ya que constituyen valores previos a la elaboración de series temporales.

Propuestas de futuras investigaciones.

Los resultados de esta tesis pueden ser aplicados para la mejora de la gestión del territorio, la clasificación de la cobertura del suelo, sus usos y la influencia antrópica, la protección de la especie, identificación de posibles especies invasoras y las variaciones espaciales y temporales debidas al cambio climático. Se proponen nuevas líneas de investigación: a)

disponer de valores específicos de reflectividad de medidas de campo que permitirán tener unos valores más precisos del *Juniperus turbinata* para la clasificación de especies, b) generar una serie temporal de la distribución de la sabina para determinar su regresión o regeneración, así como identificar variables que influyen en mayor o menor medida en su desarrollo espacial, y elaborar planes más eficaces de conservación y protección, y c) mejorar los sistemas automáticos de cálculo de las correcciones geométrica y radiométrica a las condiciones específicas de relieve y clima de El Hierro o islas con condiciones físicas similares.

The study of science in El Hierro that is presented in this thesis allows generating a reference to know its evolution in later studies, management strategies for its conservation and regeneration. The importance of Mediterranean-Macaronesian endemism *Juniperus turbinata* subsp. *canariensis* is supported by the declaration of the biosphere reserve by UNESCO and the species protected by the CEE.

In this thesis, the indexes that best determine the situation of the specific information for El Hierro have been analyzed, with special attention to factors specific to the island, such as relief and climate. The use of GeoEye-1 images has allowed us to investigate the current population of *Juniperus*. Throughout the process, the application of GIS systems has been fundamental.

In this chapter we analyze the specific objectives that are listed in chapter 1 (Introduction) and that have constituted the research in El Hierro.

Generate images with geometric and radiometric correction.

The satellite images of the GeoEye-1 used in this thesis are affected by distortions produced in its obtaining. To minimize their effects, they have been corrected both from the geometric and radiometric aspects. The assignment of cartographic coordinates to the pixels of the original data of the image has been done by obtaining control points. The precision and quality of this process has been key since it influences the following phases of the treatment of the images, obtaining better results in the areas with less slope. The climatic characteristics of the island with the almost permanent presence of clouds in the north have determined an exhaustive selection of the images to minimize the influence of the atmosphere. The dark object method has allowed to reduce the effects that the gases and particles in suspension produce in the atmosphere. The morphology of the island with strong altitudinal gradients produces areas with deep orographic shadow with which the process of topographic correction has been laborious. Of the two methods analyzed, the correction C model presents the best results, achieving a better homogenization between the more and less illuminated areas. The results may be useful in later studies of El Hierro that require high resolution images.

Analyze different vegetation indexes in the *Juniperus*.

Nine vegetation indices have been calculated and the results validated. The application of biophysical parameters such as the leaf area index and the vegetation cover fraction show that the MSAVI, the MSR and the SAVI, better describe the vegetation cover in the junipers, with higher values of the coefficient of determination. When the efficiency of the indices was determined from the Leprieur coefficient, the Range Error Ratio and the Noise

Equivalent, it was observed that the MSAVI and the MSR presented better results, being the most suitable for the identification of the juniper in the study area.

Establish spectral differences from remote detection.

From points of control in the GeoEye-1 images for laurisilva, pine and *Juniperus turbinata* in the dry and humid juniper, reflectance values have been obtained to discriminate the species. These values are proper for the date of acquisition of the images due to the seasonal variability of the species. The obtained curve is characteristic of the vegetation presenting a strong contrast between the 3 and 4 bands. It has been possible to differentiate the *Juniperus turbinata* from the dry and the wet juniper woodlands, presenting in the first case higher values of reflectivity due to a lower content of pigments. The first derivative of the spectral curve has provided data on the biochemical properties and has confirmed the greater presence of chlorophyll in the *Juniperus* of the wet juniper woodlands. The curves of the first derivative have been compared for the content of pigments between the pine and the *Juniperus turbinata* of the dry zone. The spectral range of GeoEye-1 images with a maximum at 1.200 nm does not allow to obtain values on the water content. Between laurisilva and *Juniperus* of the humid part, although there is a difference, the reflectance ranges are more similar, presenting the maximum absorption at 690 nm. The reflectivity intervals have allowed to discriminate juniper more precisely in dry juniper than in wet juniper.

Evaluate the effectiveness of GeoEye-1 images to discriminate species.

From the first phase in the geometric correction, the high resolution presented by the GeoEye-1 images, has allowed a greater minimization of the geometric distortions. In addition, this resolution allows the use of second and third degree polynomials in topographic correction. The resulting images ensure greater precision in the following phases. Several aspects make it difficult to locate juniper from satellite images: 1) the same species has different reflectance values due to different sizes and health status, causing the limits of the reflectance ranges to vary and be confused with other species, 2) the shade of the canopies and 3) sharing coverage in the juniper with other species, whether they are trees or bushes. With a resolution of 2 m and 11 bits it has been possible to adjust the reflectivity ranges from the vegetation indices. This resolution has made it possible to locate sabina in inaccessible sites, differentiate isolated individuals in the dry juniper and delimit the juniper in areas where there is plant variability forming forests. With these results, the density in reference plots has been obtained to compare the vegetation indices, confirming that the MSR and MSAVI indices are the ones that provide the best results.

Determine the density according to the characteristics of each juniper woodlands.

For the range obtained that characterizes the *Juniperus turbinata* for each type of juniper woodlands, its surface has been calculated. In the dry juniper the MSR index has a higher surface of the juniper (6.80%) and the SAVI the smaller (5.58%), with an intermediate value for the MSAVI (6.67%). Both in the wet juniper and in the juniper with pine trees, the MSAVI and SAVI have similar values and the maximum corresponds to the MSR. The values obtained show a much greater surface area in the humid zone, being between 2.5 and 4.5 the values of the dry juniper and the juniper with pine trees, where with the fayal-heath and the laurel forest forms forest. In the more rugged areas, the location of *Juniperus* is determined by the results of geometric correction, but not the quantification of the occupation surface. The highest density of *Juniperus turbinata* is found in El Golfo (wet juniper), while La Dehesa (dry juniper), El Julan (dry juniper) and Las Playas (juniper with pine trees) have a lower density. For the three selected vegetation indices (MSAVI, MSR and SAVI), wet juniper is the one with the greatest surface area with the highest density. The values obtained from the characteristic spectrum of each species show values much lower than those observed by Del Arco *et al.* (2006) in the dry juniper and in the juniper with pines. The results that have been obtained confirm that the occupation is much lower than the potential surface in the junipers, being 8.53% for the MSR, 7.84% for the MSAVI and 7.39% for the SAVI. Anthropogenic and environmental factors have influenced the extent of the *Juniperus*.

Generate a map that shows the distribution and abundance of the *Juniperus*.

The previous results (figures 6.15 to 6.18) allow to make distribution maps for the vegetation indices that best reflect the vegetation coverage, showing in La Dehesa, El Julan and Las Playas, a smaller and larger extension in El Golfo. The type of distribution is also observed, being isolated in the dry juniper woodlands. This dispersed distribution in the dry juniper and with the fayal-heath and laurel forest in the humid juniper is confirmed with the field data of temperature and humidity of the air and the soil. The cartography obtained in this thesis allows to have a base to be able to compare in later studies since they constitute values prior to the elaboration of time series.

Proposals for future research.

The results of this thesis can be applied to improve the management of the territory, the classification of the land cover, its uses and anthropogenic influence, the protection of the species, the identification of possible invasive species and spatial and temporal variations due to climate change. New lines of research are proposed: a) to have specific values of reflectivity of field measurements that will allow to have more precise values of *Juniperus*

turbinata for the classification of species, b) to generate a temporal series of the distribution of *Juniperus turbinata* to determine its regression or regeneration, as well as identify variables that have a greater or lesser influence on its spatial development, will allow to elaborate more effective plans of conservation and protection, and c) to improve the automatic calculation systems of the geometric and radiometric corrections to the specific conditions of relief and climate of El Hierro or islands with similar physical conditions.



REFERENCIAS
BIBLIOGRÁFICAS

- ADAM, E. y MUTANGA, O. (2009). Spectral discrimination of papyrus vegetation (*Cyperus papyrus* L.) in swamp wetlands using field spectrometry. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64, 612-620.
- ADAMS, R.P., MONTSERRAT ARISTA, M., BORATYNSKI, A., HOUARI, H.H., LESCHNER, H., LIBER, Z., MINISSALE, P. y SCIANDRELLO, S. (2014). Geographic variation in the leaf essential oil of *Juniperus turbinata* from throughout its range in the Mediterranean. *Phytologia*, 96(3), 149-158.
- AEMET. Ssp. Estatal de Meteorología <<https://www.aemet.es>> [Última consulta: 16/07/18].
- AEMA. Agencia Europea de Medio Ambiente <<https://eunis.eea.europa.eu/habitats/10237>> [Última consulta: 20/08/17].
- AGRAWAL, G., SARUP, J. y BHOPALI, M. (2011). Comparison of QUAC and FLAASH atmospheric correction modules on EO-1 Hyperion data of Sanchi. *Int. J. Adv. Eng. Sci. Technol.*, 4: 178–186.
- AIN-LHOUT, F. (2004). Seasonal differences in photochemical efficiency and chlorophyll and carotenoid contents in six Mediterranean shrub species under field conditions. *Photosynthetica*, 42, 309–407.
- ALONSO, A., ARROYO, L., ARBELO, M. y HERNÁNDEZ, P. (2016). Fusion of WorldView-2 and LiDAR Data to Map Fuel Types in the Canary Islands. *Remote Sensing*, 8, 669.
- AMARAL, C.H., ROBERTS, D.A., ALMEIDA, T.I.R., SOUZA FILHO, C.R. (2015). Mapping invasive species and spectral mixture relationships with neotropical woody formations in southeastern Brazil. *ISPRS Journal Photogrammetry Remote Sensing*, 108, 80–93.
- ANTROP, M. (2007). Reflecting upon 25 years of landscape ecology. *Landscape Ecology*, 22, 1441–1443.
- ARENAS, S., HAEGER, J.F. y JORDANO, D. (2011). Aplicación de técnicas de teledetección y GIS sobre imágenes Quickbird para identificar y mapear individuos de peral silvestre (*Pyrus bourgeana*) en bosque esclerófilo mediterráneo. *Revista de Teledetección*, 35, 55-71.
- ASNER, G.P. (1998). Biophysical and biochemical sources of variability in canopy reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 64, 134-153.
- ASNER, G.P., KELLER, M., EREIRA, R.P. y ZWEEDE, J.C. (2002). Remote sensing of selective logging in Amazonia Assessing limitations based on detailed field observations, Landsat ETM+, and textural analysis. *Remote Sensing of Environment*, 80, 483–496.
- ASNER, G.P., BORGHI, C.E. y OJEDA, R.A. (2003). Desertification in Central Argentina: regional changes in ecosystem carbon-nitrogen from imaging spectroscopy. *Ecological Society of America*, 13, 3, 629-648.

- ASNER, G. P., KNAPP, D.E., KENNEDY, T., BOWDOIN, M.O., JONES, R.E., MARTIN, J., OARDMAN, B. y JONES, R.F. (2008). Invasive species detection in Hawaiian rainforests using airborne imaging spectroscopy and LIDAR. *Remote Sensing of Environment*, 112, 1942–1955.
- ASNER, G.P., JONES, M.O., MARTIN, R.E., KNAPP, D.E. y HUGHES, R.F. (2008). Remote sensing of native and invasive species in Hawaiian forests. *Remote Sensing of Environment*, 112, 1912-1926.
- BANNARI, A., MORIN, D., BONN, F. y HUETE, A.R. (1995). A review of vegetation indices. *Remote Sensing Reviews*, 13, 95-120.
- BARALDI, A., GIRONDA, M. y SIMONETTI, D. (2010). Operational Two-Stage Stratified Topographic Correction of Spaceborne Multispectral Imagery Employing an Automatic Spectral-Rule-Based Decision-Tree Preliminary Classifier. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48(1): 112-146.
- BARET, F. y GUYOT, G. (1991). Potentials and Limits of Vegetation Indices for LAI and APAR Assessment. *Remote Sensing of Environment*, 35 (2), 161–173.
- BEAUDOIN, A., VIDAL, A., DESBOIS, N. y DEBAUX-ROS, C. (1995). Monitoring the water status of Mediterranean forest using ERS-1, to support fire risk prevention. *IGARSS '95 (Quantitative Remote Sensing for Science and Applications)*. Florence, Italy, 963-965.
- BELLO, V., GARCÍA, C., DEL ARCO, M.J., HERNÁNDEZ, R. y GONZÁLEZ, J.M. (2016). Spatial dynamics of expanding fragmented thermophilous forests on a Macaronesian island. *Forest Ecology and Management*, 379, 1, 165-172.
- BELWARD, A.S. (1991). Spectral Characteristics of vegetation, Soil and Water in the Visible, Near-Infrared and Middle-Infrared Wavelengths. *Remote Sensing and GIS for Resource Management in Developing Countries*, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 31-53.
- BERK, A., BERNSTEIN, L.S., ANDERSON, G.P., ROBERTSON, D.C., CHETWYND, J.H. y ADLERGOLDEN, S.M. (1998). MODTRAN cloud and multiple scattering upgrades with application to AVIRIS. *Remote Sensing of Environment*, 65, 367-375.
- BERNSTEIN, R. (1978): Digital image processing of Earth observation sensor data. In: Bernstein, R. (ed.). *Digital Image Processing for Remote Sensing*, New York, IEEE Press: 55-72.
- BLACKBURN, G.A. y STEELE, C.M. (1999). Towards the Remote Sensing of Matorral Vegetation Physiology: Relationships between Spectral Reflectance, Pigment, and Biophysical. *Remote Sensing of Environment*, 70, 3, 278-292.
- BONAN, G.B. (1993). Importance of leaf-area index and forest type when estimating photosynthesis in boreal forests. *Remote Sensing of Environment*, 43, 303-314.
- BOUILLON, A., BRETON, E., DE LUSSY, F. y GACHET, R. (2002): SPOT5 HRG and HRS first in-flight geometric quality results. Proceedings of SPIE, Vol. 4881A: Sensors, system and Next Generation Satellites VII, Agia Pelagia, Crete, Greece, 22–27.

- BRIZUELA, A.B., AGUIRRE, C. A. y VELASCO, I. (2007). Aplicación de métodos de corrección atmosférica de datos Landsat 5 para análisis multitemporal. *TELEDETECCIÓN - Hacia un mejor entendimiento de la dinámica global y regional* Ed. Martín.
- BROGE, N.H. y LEBLANC, E. (2000). Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density. *Remote Sensing of Environment*, 76, 156-172.
- BROSZEIT, A. y ASHRAF, S. (2013). Using different atmospheric correction methods to classify remotely sensed data to detect liquefaction of the February 2011 earthquake in Christchurch. In Proceedings of the GIS and Remote Sensing Research Conference, Dunedin, New Zealand, 29–30 August.
- BUITEN, H.J. y VAN PUTTEN, B. (1997). Quality assessment of remote sensing image registration and testing of control point residuals. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 52, 57-73.
- BURBANO, S., BURBANO, E. y GRACÍA, C. (1993). Física general. *Mira editores, S.A.*, Zaragoza.
- CAMPBELL, N.A. (1996). The decorrelation stretch transform. *International Journal of Remote Sensing*, 17, 1939-1949.
- CAMPO, A., GARCÍA, R., MARINAS, A. y GARTZIA, M. (2005). Relaciones entre el índice espectral de vegetación NDVI y la cobertura vegetal en pastos de puerto del Pirineo occidental. *XLV Reunión Científica de la SEEP*.
- CAMPO-MORENO, S. y SALVÀ-CATARINEU, M. (2014). Cartografía de los sabinars de *Juniperus turbinata* Guss. en El Hierro (Islas Canarias) mediante teledetección. Primeros resultados. *XVI Congreso Nacional TIG*, 25-27 junio, Alicante.
- CANTY, M. J., NIELSEN, A. A. y SCHMIDT, M. (2004). Automatic radiometric normalization of multitemporal satellite imagery. *Remote Sensing of Environment*, 91(3–4): 441–451.
- CARLSON, T.N. y RIPLEY, D.A. (1997). On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, 62(3), 241–252.
- CARRACEDO, J.C., DAY, S.J., GUILLOU, H. y PÉREZ TORRADO, F.J. (1997). El Hierro, Geological Excursion Guidebook. International Workshop on Volcanism & Volcanic Hazards in Immature Intraplate Oceanic Islands. 19-21 September, 1-43.
- CARRACEDO, J.C., RODRÍGUEZ-BADIOLA, E., GUILLOU, H., DE LA NUEZ, J. y PÉREZ-TORRADO, F.J. (2001). Geology and volcanology of La Palma and El Hierro, Western Canaries. *Estud. Geol.*, 57, 171-295.
- CARRACEDO, J.C. (2008). Los volcanes de las islas Canarias IV La Palma, La Gomera, El Hierro. Ed. Rueda, 216 pp.

- CARRACEDO, J.C. y TROLL, V.R. (2013). (Eds.), Teide Volcano: Evolution of an Active Ocean Island Volcano, Springer.
- CARRACEDO, J.C., TROLL, V.R., ZACZEK, K., RODRÍGUEZ, A., SOLER, V. y DEEGAN, F.M. (2015). The 2011–2012 submarine eruption of El Hierro, Canary Islands: New lessons in oceanic island growth and volcanic crisis management. *Earth-Science Reviews*, 150, 168–200.
- CEA, C., CRISTÓBAL, J. y PONS, X. (2007). An improved methodology to map snow cover by means of Landsat and MODIS imagery. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. *IEEE Internacional*, 4217–4220.
- CECCATO, P., FLASSEB, S., TARANTOLA, S., JACQUEMOUD, S. y GRÉGOIRE, J.M. (2001). Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain. *Remote Sensing of Environment*, 77, 22–33.
- CNIG. Centro Nacional de Información Geográfica. Centro de descargas. <<http://centrodedescargas.cnig.es>> [Última consulta: 20/05/2017]
- CHANDER, G. y MARKHAM, B.L. (2003). Revised Landsat-5 TM Radiometric Calibration Procedures, and Post-Calibration Dynamic Ranges. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41, 11, 2674–2677.
- CHANDER, G., MARKHAM, B.L. y HELDER, D.L. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, 113: 893–903.
- CHANG, J., CLAY, D.E., LEIGH, L., AARON, D., DALSTED, K. y VOLZ, M. (2008). Evaluating modified atmospheric correction methods for Landsat Imagery: Image-based and model-based calibration methods. *Commun. Soil Sci. Plan.*, 39: 1532–1545.
- CHAVEZ, P.S. (1988). An Improved Dark-Object Subtraction Technique for Atmospheric Scattering Correction of Multispectral Data. *Remote Sensing of Environment*, 24: 459–479.
- CHAVEZ, P.S. (1996). Image-Based Atmospheric Corrections. Revised and Improved. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62(9): 1025–1036.
- CHEN, J. (1996a). Evaluation of Vegetation Indices and a Modified Simple Ratio for Boreal Applications. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 22:3, 229–242.
- CHEN, J. (1996b). Canopy Architecture and Remote Sensing of the Fraction of Photosynthetically Active Radiation Absorbed the Boreal Conifer Forests. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34(6):1353–1368.
- CHEN, L.C. y TEO, T.A. (2002), Rigorous generation of orthophotos from EROS-A high resolution satellite images. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Ottawa, Canada, July 8–12 (Natural Resources Canada: Ottawa, Ontario), 34 (B4), 620–625.

- CHEN, X., VIERLING, L. y DEERING, D. (2005a). A simple and effective radiometric correction method to improve landscape change detection across sensors and across time. *Remote Sensing of Environment*, 98: 63 – 79.
- CHEN, X., VIERLING, L., DEERING, D. y CONLEY, A. (2005b): Monitoring boreal forest LAI across a Siberian burn chronosequence: A MODIS validation study. *International Journal of Remote Sensing*, in press.
- CHEN, J., PAN, D. y MAO, Z. (2009). Image-object detectable in multiscale analysis on high-resolution remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 30:14, 3585-3602.
- CHENG, K-S., YEH, H-C. y TSAI, C-H. (2000): An anisotropic spatial modeling approach for remote sensing image rectification. *Remote Sensing of environment*, 73: 46-54.
- CHIN, M. (2009). Atmospheric aerosol properties and climate impacts-synthesis and assessment product 2,3. *Report by the US Climate Change Science Program and the subcommittee on Global Change Research*, Washington, D.C.
- CHOUDHURY, B.J., AHMED, N.U., IDSO, S.B., REGINATO, R.J., DAUGHTRY, C.S.T. (1994). Relations between evaporation coefficients and vegetation indexes studied by model simulations. *Remote Sensing of Environment*, 50(1), 1–17.
- CHUVIECO, E., (1990): Fundamentos de teledetección especial. *Rialp*, Madrid. Spain, 453 pp.
- CHUVIECO, E. (2002). Teledetección Ambiental. *Ariel*. Barcelona, Spain.
- CHUVIECO, E. (2010). Teledetección Ambiental. La observación de la Tierra desde el espacio. *Ariel*, Barcelona, Spain.
- CIHLAR, J., ST-LAURENT, L. y DYER, J.A. (1991). Relation between the normalized difference vegetation index and ecological variables. *Remote Sensing of Environment*, 35 (2–3), 279-298.
- CIVCO D.L. (1989). Topographic normalization of Landsat Thematic Mapper digital imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 55 (9): 1303-1309.
- COHEN, W.B., MAIERSPERGER, T.K., YANG, Z., GOWER, S.T., TUMER, D.P. y RITTS, W.D. (2003). Comparisons of land cover and LAI estimates derived from ETM+ and MODIS for four sites in North America: A quality assessment of 2000/2001 provisional MODIS products. *Remote Sensing of Environment*, 88: 233– 255.
- COHEN, W.B. y GOWARD, S. N. (2004). Landsat's role in ecological applications of remote sensing. *BioScience*, 54, 535–545.
- COLBY, J.D. (1991). Topographic normalization in rugged terrain. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 57: 531-537.

- CONESE, C., GILABERT, M.A., MASELLI, F. y BOTTAI, L. (1993). Topographic normalization of TM scenes through the use of an atmospheric correction method and digital terrain models. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 59: 1745-1753.
- COPPIN, P.R. y BAUER, M.E. (1994). Processing of multi temporal Landsat TM imagery to optimize extraction of forest cover change features. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 32(4), 918–927
- COPPIN, P., JONCKHEERE, I., NACKAERTS, K., MUYS, B. y LAMBIN, E. (2004): Digital change detection methods in ecosystem monitoring: A review. *International Journal of Remote Sensing*, 10, 1565–1596.
- COWLING, S.A. y FIELD, C.B. (2003). Environmental control of leaf area production: Implications for vegetation and land-surface modeling. *Global Biogeochemical Cycles*, 17, 1007.
- CRACKNELL, A.P. (1997). Advanced Very High Resolution Radiometer AVHRR. CRC Press.
- CRISTÓBAL J., JIMÉNEZ MUÑOZ, J.C., SOBRINO, J.A., NINYEROLA y M., PONS, X. (2009). Improvements in land surface temperatura retrieval from the Landsat vseries thermal band using wáter vapour and air temperatura. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 11.
- CUARTERO, A. y FELICÍSIMO, A.M. (2003): Rectificación y ortorrectificación de imágenes de satélite: análisis comparativo y discusión. *Revista internacional de ciencia y tecnología de la información geográfica*, 3: 45-57.
- CURRAN, P.J. (1980). Remote sensing systems for monitoring crops and vegetation. *Progress in Physical Geography*, 4, 315-341.
- CURRAN, P.J. (1983). Estimating green LAI from multispectral aerial-photography. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 49, 1709-1720.
- CURRAN, P.J. (1989). Remote Sensing of foliar chemistry. *Remote Sensing of Environment*, 30, 271-278.
- DANAHER, T., WU, X. y CAMPBELL, N. (2001). Bi-directional reflectance distribution function approaches to radiometric calibration of Landsat ETM+ imagery IGARSS 2001. Scanning the Present and Resolving the Future. Proceedings. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 6, 2654 –2657.
- DANSON, F.M. y PLUMMER, S.E. (1995). Red-edge response to forest leaf área index. *International Journal of Remote Sensing*, 16, 183-188.
- DAVIES, K.W., PETERSEN, S.L., JOHNSON, D.D., DAVIS, D.B., MADSEN, M.D., ZVIRZDIN, D.L. y BATES, J.D. (2010). Estimating juniper cover from National Agriculture Imagery Program (NAIP) imagery and evaluating relationships between potential cover and environmental variables. *Rangel. Ecol. Manage.* 63, 630–637.

- DAVISON, G.J. (1984): Ground control pointing and geometric transformation of satellite imagery. Remote Sensing Workshop on Terrestrial Positioning and Geometric Correction of Imagery, Nottingham, Department of Geography, University of Nottingham: 45-59.
- DEFRIES, R.S., HANSEN, M.C., TOWNSHEND, J.R.G., JANETOS, A.C. y LOVELAND, T.R. (2000). A new global 1-km dataset of percentage tree cover derived from remote sensing. *Global Change Biology*, 6, 2, 247-254.
- DEL ARCO, M.J., ACEBES, J.R. y PÉREZ DE PAZ, P.L. (1996). Bioclimatology and climatophilous vegetation of the Island of El Hierro (Canary Islands). *Phytocoenologia*, 26, 445-479.
- DEL ARCO, M.J., ACEBES, J.R., PÉREZ DE PAZ, P.L. y MARRERO, M. (1999). Bioclimatology and climatophilous vegetation of the Island of Hierro (part II) and La Palma (Canary Islands). *Phytocoenologia*, 29, 253-290.
- DEL ARCO, M.J., WILDPRET, W., PÉREZ, P.L., RODRÍGUEZ-DELGADO, O., ACEBES, J.R., GARCÍA, A., MARTÍN, V.E., REYES, A., SALAS, M., DÍAZ, M.A., BERMEJO, J.A., GONZÁLEZ, R., CABRERA, M.V. y GARCÍA, S. (2006). Mapa de Vegetación de Canarias. GRAFCAN SL, Santa Cruz de Tenerife.
- DEL ARCO, M.J., GONZÁLEZ-GONZÁLEZ, R., GARZÓN-MACHADO, V. y PIZARRO-HERNÁNDEZ, B. (2010). Actual and potential natural vegetation on the Canary Islands and its conservation status. *Biodivers. Conserv.*, 19, 3089-3140.
- DÍAZ, F., MONTERO, G., ESCOBAR, J.M., RODRÍGUEZ, E. y MONTENEGRO, R. (2015). A new predictive solar radiation numerical model. *Applied Mathematics and Computation*, 267, 596-603.
- DÍAZ, F., MONTERO, H., SANTANA, D., MONTERO, G., RODRÍGUEZ, E., MAZORRA, L. y OLIVER, A. (2018). Improving shadows detection for solar radiation numerical models. *Applied Mathematics and Computation*, 319, 71-85.
- DÍAZ-DELGADO, R. (2010). An integrated monitoring programme for Doñana Natural Space: The set-up and implementation. Conservation Monitoring in Freshwater Habitats: A Practical Guide and Case Studies (eds C. Hurford, M. Schneider & I. Cowx), 339-355. *Springer Science and Business Media*, Dordrecht
- DIGITALGLOBE (2011). GeoEye-1 Radiance at Aperture and Planetary Reflectance. <<https://www.digitalglobe.com>> [Última consulta: 05/10/2017].
- DIGITALGLOBE (2013a). GeoEye-1. <https://dg-cms-uploads-production.s3.amazonaws.com/uploads/document/file/97/DG_GeoEye1.pdf> [Última consulta: 20/06/2016].
- DIGITALGLOBE (2013b). Core Product Imagery Guide v.1.2. Obtenido de <<https://www.digitalglobe.com>> [Última consulta: 20/06/2016].

- DIGITALGLOBE (2014). Imagery Support Data (ISD). Documentation v.1.1.2 < https://dgcms-uploads-production.s3.amazonaws.com/uploads/document/file/106/ISD_External.pdf> [Última consulta: 05/02/2016].
- DONMEZ, C., BERBEROGLU, S., ERDOGAN, M. A., TANRIOVER, A. A., y CILEK, A. (2015). Response of the regression tree model to high resolution remote sensing data for predicting percent tree cover in a Mediterranean ecosystem. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187 (4).
- DORTA, P. (1996). Las Inversiones Térmicas en Canarias. *Investigaciones Geograficas*, 15, 109-124.
- DU, Y., CIHLAR, J., BEAUBIEN, J. y LATIFOVIC, R. (2001). Radiometric normalization, compositing, and quality control for satellite high resolution image mosaics over large areas. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39, 623–634.
- DU, Y., TEILLET, P. M. y CIHLAR, J. (2002): Radiometric normalization of multitemporal high-resolution satellite images with quality control for land cover change detection. *Remote Sensing of Environment*, 82, 123– 134.
- DUGGIN, M.J. y ROBINOVE, C.J. (1990). Assumptions implicit in remote sensing data acquisition and analysis. *International Journal of Remote Sensing*, 11, 1669–1694.
- DUGUAY, C.R. y LEDREW, E.F. (1992). Estimating surface reflectance and albedo from Landsat-5 TM over rugged terrain. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 58, 551-558.
- DYMOND, J., SHEPHERD, J. y QIB, J. (2001). A simple physical model of vegetation reflectance for standardising optical satellite imagery, *Remote Sensing of Environment*, 75, 350–359.
- ECKHARDT, D.W., VERDIN, J.P. y LYFORD, G.R. (1990). Automated update of an irrigated lands GIS using SPOT HRV imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 56, 1515–1522.
- EDIRIWEERA, S., PATHIRANA, S., DANAHER, T., NICHOLS, D. y MOFFIET, T. (2013). Evaluation of Different Topographic Corrections for Landsat TM Data by Prediction of Foliage Projective Cover (FPC) in Topographically Complex Landscapes *Remote Sensing*, 5, 6767-6789.
- EHLERS, M. y WELCH, R. (1988). Kartographische Leistungs- fähigkeit von Landsat-TM Aufnahmen. *Bildmess. Luftbild- ves.*, 56, 138-147.
- EKSTRAND, S. (1996). Landsat TM-based forest damage assessment: Correction for topographic effects. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62, 151–161.
- ELMAHDY, S. I. y MOHAMED, M. M. (2016). Factors controlling the changes and spatial variability of Junipers phoenicea in Jabal Al Akhdar, Libya, using remote sensing and GIS. *Arabian Journal of Geosciences*, 9, 478.

- ELMORE, A.J., MUSTARD, J.F., MANNING, S.J. y LOBELL, D.B. (2000). Quantifying vegetation change in semiarid environments: precision and accuracy of spectral mixture analysis and the normalized difference vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 73, 87–102.
- ELVIDGE, C. D. y CHEN, Z. (1995). Comparison of broad-band and narrow-band red and near-infrared vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 54, 38–48.
- ERIKSON, M. (2005). Species classification of individually segmented tree crowns in high-resolution aerial images using radiometric and morphologic image measure. *Remote Sensing of Environment*, 91, 469 – 477.
- ESA (Earth Observation Portal) (2018). <<https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/g/geoeye-1>> [Última consulta: 10/07/2017].
- ESRI. (2016a). Principios básicos de georreferenciación de un dataset ráster. *ESRI*. <<https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/fundamentals-for-georeferencing-a-raster-dataset.htm>> [Última consulta: 25/03/2017].
- ESRI. (2016b). Principios básicos de georreferenciación de un dataset ráster. *ESRI*. <<https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.4/extensions/spatial-analyst/performing-analysis/cell-size-and-resampling-in-analysis.htm>> [Última consulta: 10/02/2017].
- EUGENIO, F., MARCELLO, J., MARTIN, J. y RODRÍGUEZ-ESPARRAGÓN, D. (2017). Benthic Habitat Mapping Using Multispectral High-Resolution Imagery: Evaluation of Shallow Water Atmospheric Correction Techniques. *Sensors* (14248220), 17 (11), 1-23.
- EVERITT, J.H., YANG, C. y JOHNSON, H.B. (2007). Canopy Spectra and Remote Sensing of Ashe Juniper and Associated Vegetation. *Environ. Monit. Assess.*, 130, 403–413.
- FADAEI, H., SUZUKI, R., SAKAI, T. y TORII, K. (2012). A proposed new vegetation index, the total ratio vegetation index (TRVI), for arid and semi-arid regions. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXIX-B8. XXII ISPRS Congress, 25 August – 01 September, Melbourne, Australia.
- FERNÁNDEZ-PALACIOS, J.M., OTTO, R., DELGADO, J.D., ARÉVALO, J.R., NARANJO, A., GONZÁLEZ-ARTILES, F., MORICI, C. y BARONE, R. (2008). Los bosques termófilos de Canarias. Proyecto LIFE04/NAT/ES/000064. Exmo. Cabildo Insular de Tenerife, Santa Cruz de Tenerife.
- FERNÁNDEZ, N., PARUELO, J.M. y DELIBES, M. (2010). Ecosystem functioning of protected and altered Mediterranean environments: A remote sensing classification in Doñana, Spain. *Remote Sensing of Environment* 114, 211–220.
- FERNÁNDEZ-PELLO, L. (1985). Comentario del mapa geomorfológico de la isla de El hierro. *Revista de geografía canaria*, 1, 31-32.
- FERNÁNDEZ-PELLO, L. (1989). Los paisajes naturales de la isla de El Hierro. Excmo. Cabildo insular de El Hierro. Centro de la cultura popular canaria.

- FERNÁNDEZ-PELLO, L., GONZÁLEZ, M.L. y QUITANTES GONZÁLEZ, F. (2006). La influencia de los factores geográficos en la organización interna de un bosque residual: el Sabinar de la Dehesa (El Hierro, Islas Canarias). *III International Congress on Juniperus*. Actas: 263-271. Soria. España.
- FILLOL, E., BARET, F., WEISS, M., DEDIEU, G., DEMAREZ, V., GOUAUX, P. y DUCROT, D. (2006). Cover fraction estimation from high resolution SPOT HRV & HRG and medium resolution SPOT-VEGETATION sensors. Validation and comparison over South-west France. *In Proceedings of the Second International Symposium on Recent Advances in Quantitative Remote Sensing*, Torrent (Valencia), Spain, 25–29 September, pp. 659–663.
- FLOOD, N., DANAHER, T., GILL, T. y GILLINGHAM, S. (2013). An Operational Scheme for Deriving Standardised Surface Reflectance from Landsat TM/ETM+ and SPOT HRG Imagery for Eastern Australia. *Remote Sensing*, 5, 83–109.
- FONT, I. (1959). El clima en las Islas Canarias. *Anuario de Est. Atlánticos*, 5, 5-22. Las Palmas de Gran Canaria.
- FORSTER, B.C. (1984). Derivation of atmospheric correction procedures for Landsat MSS with particular reference to urban data. *International Journal Remote Sensing*, 5: 799-817.
- FRANKLIN, S.E. y WILSON, B.A. (1991). Suatial and spectral classification methods in remote sensing. *Computers and Geosciences*, 17, 8, 1151 -1172.
- FRANKLIN, S.E. y GILES, P.T. (1995). Radiometric processing of aerial and satellite remote-sensing imagery. *Computers and Geosciences*, 21, 413–423.
- FUENTES, D.A., GAMON, J.A., QIU, H.L., SIMS, D.A. y ROBERTS, D.A. (2001). Mapping Canadian boreal forest vegetation using pigment and water absorption features derived from the AVIRIS sensor. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 106 (D24), 33565-33577.
- FUSTER, J.M. (1975). Las islas Canarias un ejemplo de evolución temporal y especial del vulcanismo volcánico. *Estud. Geol.*, 31, 439-463.
- GAISBERG, M.V. (2005). Die Vegetation der Fusstufe von El Hierro (Kanarische Inseln). *Dissertationes Botanicae*, 395, 1-364.
- GAO, Y. y ZHANG, W. (2009). A simple empirical topographic correction method for ETM+ imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 30 (9), 2259-2275.
- GAO, Y., ZHANG, W., VERAVERBEKE, S., VERSTRAETEN, W., LHERMITTE, S. y GOOSSENS, R. (2010). Illumination effects on the differenced Normalized Burn Ratio's optimality for assessing fire severity. *International journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 12, 60-70.

- GAO, M., ZHAO, W., GONG, Z., GONG, H., CHEN, Z. y TANG, X. (2014). Topographic Correction of ZY-3 Satellite Images and Its Effects on Estimation of Shrub Leaf Biomass in Mountainous Areas. *Remote Sens.*, 6, 2745-2764.
- GARCÍA LÓPEZ, J.M. y ALLUÉ CAMACHO, C. (2005). Caracterización y potencialidades fitoclimáticas de la sabina albar (*Juniperus thurifera* L.) en la Península Ibérica. *Invest. Agrar.: Sist. Recur. For.*, 14(1), 98-109.
- GARCÍA, C., MORACHO, E., DÍAZ-DELGADO, R. y JORDANO, P. (2014). Long-term expansion of juniper populations in managed landscapes: patterns in space and time. *Journal of Ecology*, 102, 1562–1571.
- GARCÍA-ROMERO, L., HERNÁNDEZ-CORDERO, A.I., HERNÁNDEZ-CALVENTO, L., ESPINO, E.P.C. y LÓPEZ-VALCARCEL, B.G. (2018). Procedure to automate the classification and mapping of the vegetation density in arid aeolian Sedimentary systems. *Progress in Physical Geography*, 42(3), 330–351.
- GARZÓN-LÓPEZ, C.X., BOHLMAN, S.A., OLFF, H. y JANSEN, P.A. (2012). Mapping tropical forest trees using high-resolution aerial digital photographs. *Biotropica*, 1–9.
- GASTÓN, A. (2006). Influencia del uso del suelo en la distribución de la sabina albar (*Juniperus thurifera* L.) en la península ibérica. III Coloquio Internacional sobre los Sabinares y Enebrales (Género *Juniperus*): Ecología y Gestión Forestal Sostenible. Soria, 24 a 26 de mayo.
- GATES, D.M., KEEGAN, H.J., SCHLETER, J.C. y WEIDNER, V.R. (1965). Spectral properties of plants. *Applied Optics*, 4, 11-20.
- GEE, M.R.J., WATTS, A., BATTS, D.G., MASSON, D.G. y MITCHELL, N.C. (2001). Landslides and the evolution of El Hierro in the Canary Islands. *Mar. Geol.*, 177, 271-293.
- GELDMACHER, J., HOERNLE, K., VAN DER BOGAARD, P., S. DUGGEN, S. y WERNER, R. (2005). New ⁴⁰Ar/³⁹Ar age and geochemical data from seamounts in the Canary and Madeira volcanic provinces: support for the mantle plume hypothesis. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 237, 85-101.
- GIANINETTO, M., SCAIONI, M., MONDINO, E.B. y TONOLO, F.G. (2004). Satellite images geometric correction based on non-parametric algorithms and self-extracted GCPs. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium, (IGARSS)*, 6: 3755-3758.
- GIBBES, C., ADHIKARI, S., ROSTANT, L., SOUTHWORTH, J. y QIU, Y. (2010). Application of object based classification and high resolution satellite imagery for savanna ecosystem analysis. *Remote Sensing*, 2, 2748–2772.
- GILABERT, M.A., PIQUERAS-GONZÁLEZ, J. y GARCÍA-HARO, J. (1997). Acerca de los Índices de Vegetación. *Revista de teledetección*, 8.

- GILABERT, M.A., CONESE, C. y MASELLI, F. (1994). An atmospheric correction method for the automatic retrieval of Surface reflectances from TM images. *International Journal of Remote Sensing*, 15, 2065-2086.
- GILABERT, M.A., GANDIA, S. y MELIA, J. (1996). Analyses of spectral-biophysical relationships for a corn canopy. *Remote Sensing of Environment*, 55, 11-20.
- GILABERT, M. A., PIQUERAS-GONZÁLEZ, J., GARCÍA-HARO, F. J. y MELIÁ, J. (2002). A generalized soil-adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 82, 303-310.
- GITAS, I.Z. y DEVEREUX, B.J. (2006). The role of topographic correction in mapping recently burned Mediterranean forest areas from Landsat TM images. *International Journal of remote Sensing*, 27, 41-54.
- GITELSON, A.A., KAUFMAN, Y.J. y MERZLYAK, M.N. (1996). Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 58, 289-298.
- GITELSON, A.A. (2004). Wide dynamic range vegetation index for remote quantification of biophysical characteristics of vegetation. *Journal of Plant Physiology*, 161(2):165–173.
- GITELSON, A.A., B.D. WARDLOW, KEYDAN, G.P. y LEAVITT, B. (2007). An evaluation of MODIS 250-m data for green LAI estimation in crops. *Geophysical Research Letters*, 34, L20403.
- GITELSON, A.A., CHIVKUNOVA, O.B. y MERZLYAK, M.N. (2009). Nondestructive estimation of anthocyanins and chlorophylls in anthocyanic leaves. *Am. J. Bot.*, 96, 1861–1868.
- GITELSON, A.A. (2011). Nondestructive estimation of foliar pigment (chlorophylls, carotenoids, and anthocyanins) contents. In *Hyperspectral Remote Sensing of Vegetation*; Thenkabail, A., Lyon, P.S., Huete, J.G., Eds.; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 141–166.
- GODOY, R. (1982). La isla de El Hierro. Exposiciones, Congresos y Convenciones de España.
- GOEL, N.S. (1988). Models of vegetation canopy reflectance and their use in estimation of biophysical parameters from reflectance data. *Remote Sens. Rev.*, 4, 1-212.
- GONZÁLEZ, M.L., FERNÁNDEZ-PELLO, L. y QUIRANTES-GONZÁLEZ, F. (2017). Análisis geográfico del sabinar de Afur (Tenerife, Islas Canarias). *Ería*, 1 (nueva época), 51-65.
- GOSLEE, S.C. (2012). Topographic corrections of satellite data for regional monitoring. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 78 (9): 973–981.
- GOUGEON, F. A., LECKIE, D. G., PARADINE, D. y SCOTT, I. (1998). Individual tree crown species recognition: The Nahmint study. Proceedings of the international forum on automated interpretation of high spatial resolution digital imagery for forestry, 10 – 12 February 1998, Victoria, British Columbia, Canada, Natural Resources Canada/Canadian Forest Service, 209 – 223 (Victoria, British Columbia, Canada).

- GOVAERTS, Y.M., VERSTRAETE, M.M., PINTY, B. y GOBRON, N. (1999). Designing optical spectral indices: A feasibility and proof of concepts study. *International Journal of Remote Sensing*, 20, 1853-1873.
- GREENBERG, J.A., DOBROWSKI, S.L. y USTIN, S.L. (2005). Shadow allometry: estimating tree structural parameters using hyperspatial image analysis. *Remote Sensing of Environment*, 97, 15–25.
- GU, D., y GILLESPIE, A. (1998). Topographic Normalization of Landsat TM Images of Forest Based on Subpixel Sun–Canopy–Sensor Geometry. *Remote Sens. Environ.*, 64: 166–175.
- GU, H.Y., DAI, L.M., WU, G., XU, D., WANG, S.Z. y WANG, H. (2006). Estimation of forest volumes by integrating Landsat TM imagery and forest inventory data. *Science in China Series E – Technological Sciences*, 49, 54–62.
- GUILLOU, H., CARRACEDO, J.C., PÉREZ-TORRADO, F. y RODRÍGUEZ BADIOLA, E. (1996). K–Ar ages and magnetic stratigraphy of a hotspot-induced, fast-grown oceanic island: El Hierro, Canary Islands. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 73, 141-155.
- HABOUDANE, D., MILLER, J., PATTEY, E., ZARCO-TEJADO, P. y STRACHAN, I. (2004). Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. *Remote Sensing of Environment*, 90, 337-352.
- HADJIMITSIS, D.G., RETALIS, A. y CLAYTON, C.R.I. (2002). The assessment of atmospheric pollution using satellite remote sensing techniques in large cities in the vicinity of airports. Water, Air and Soil Pollution. *Focus, an International Journal of Environmental Pollution*, 2(5–6): 631–640.
- HADJIMITSIS, D.G., CLAYTON, C.R.I. y HOPE, V.S. (2004). An assessment of the effectiveness of atmospheric correction algorithms through the remote sensing of some reservoirs. *Int. J. Remote Sens.*, 25, 3651–3674.
- HADJIMITSIS, D.G., THEMISTOCLEOUS, K., VRYONIDES, P., TOULIOS, L. y CLAYTON, C.R.I. (2007). Applications of satellite remote sensing and GIS to urban air-quality monitoring: potential solutions and suggestions for the Cyprus area. *Proceeding of the 6th International Conference on Urban Air Quality*, 144, Limassol, Cyprus.
- HÁJEK, F. (2006). Object-oriented classification of Ikonos satellite data for the identification of tree species composition. *Journal of Forest Science*, 52(4), 181-187.
- HALE S.R. y ROCK, B.N. (2003). Impact of topographic normalization on land-cover classification accuracy. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 69, 785–791.
- HALL, F.G., BOTKIN, D.B., STREBEL, D.E., WOODS, K.D. y GOETZ, S.J. (1991). Large-scale patterns of forest succession as determined by remote sensing. *Ecology*, 72, 628–640.

- HALL D.K., FOSTER, J.L., VERBYLA, D.L., KLEIN, A.G. y BENSON, C.S. (1998). Assessment of snow-cover mapping accuracy in a variety of vegetation-cover densities in Central Alaska. *Remote sensing of Environment*, 66, 129–137.
- HALL, R.J., SKAKUN, R.S., ARSENAULT, E.J. y CASE, B.S. (2006). Modeling forest stand structure attributes using Landsat ETM+ data: application to mapping of aboveground biomass and stand volume. *Forest Ecology and Management*, 225, 378–390.
- HAMMILL, K.A. y BRADSTOCK, R.A. (2006). *Remote sensing of fire severity in the Blue Mountains: influence of vegetation type and inferring fire intensity*. *International Journal of Wildland Fire*, 15(2), 213–226.
- HANSEN, A. y SUNDING, P. (1993). Flora of Macaronesia. Check-list of Vascular Plants. 4 revised edition. *Sommerfeltia*, 17, 1-295.
- HANSEN, M.C., DEFRIES, R.S., TOWNSHEND, J.R. G., CARROLL, M., DIMICELLI, C. y SOHLBERG, R.A. (2003). Global percent tree cover at a spatial resolution of 500 meters: first results of the MODIS vegetation continuous fields algorithm. *Earth Interactions*, 7, 10.
- HANSEN M.C., TOWNSHEND, J.R.G., DEFRIES, R.S. y CARROLL, M. (2005.) Estimation of tree cover using MODIS data at global, continental and regional/local scales. *Int J Remote Sens.*, 26, 4359–4380.
- HANSEN, M.C., STEHMAN, S.V., POTAPOV, P.V., LOVELAND, T.R., TOWNSHEND, J.R.G., DEFRIES, R.S., ITTMAN, K.W., ARUNARWATI, B., STOLLE, F., STEININGER, M.K., CARROLL, M. y DIMICELI, C. (2008). Humid tropical forest clearing from 2000 to 2005 quantified using multi-temporal and multiresolution remotely sensed data. *Proceedings National Academy of Sciences USA*, 105(27), 9439–9444.
- HANSEN, M.C., STEHMAN, S.V. y POTAPOV, P.V. (2010). Quantification of global gross forest cover loss. *Proceedings National Academy of Sciences USA*, 107, 8650–8655.
- HANSEN, M.C., POTAPOV, P.V., MOORE, R., HANCHER, M., TURUBANOVA, S.A., TYUKAVINA, A., THAU, D., STEHMAN, S.V., GOETZ, S.J., LOVELAND, T.R., KOMMAREDDY, A., EGOROV, A., CHINI, L., JUSTICE, C.O. y TOWNSHEND, J.R.G., (2013). High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science*, 342 (6160), 850–853.
- HANTSON, S. y CHUVIECO, E. (2011). Evaluation of different topographic correction methods for Landsat imagery. *Int. J. Appl. Earth Observ. Geoinf.*, 13, 691–700.
- HARDY, C.C. y BURGAN, R.E. (1999). *Evaluation of NDVI for monitoring live moisture in three vegetation types of the western US*. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 65(5), 603-610.
- HERNÁNDEZ PACHECO, A.(1982). Sobre una posible erupción en 1793 en la isla de El Hierro (Canarias). *Estud. Geol.*, 38,15-25.

- HEROLD, N. (2003). Mapping impervious surfaces and forest canopy using classification and regression tree (CART) analysis. *Proceedings of the 2003 ASPRS Annual Convention*, Anchorage, AK.
- HOLBEN, B. y JUSTICE, C. (1981). An examination of spectral band ratioing to reduce the topographic effect on remotely sensed data. *International Journal of Remote Sensing*, 2, 115-133.
- HOLLAND, D.A., BOYD, D.S. y MARSHALL, P. (2006). Updating topographic mapping in Great Britain using imagery from high-resolution satellite sensors. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 60, 212–223.
- HORLER, D.N.H., DOCKRAY, M. y BARBER, J. (1983). The red edge of plant leaf reflectance. *International Journal of Remote Sensing*, 4, 273-288.
- HU, T. y LI, L. (2011). A new ground control point image-chip automatic matching method for remote sensing image location processing. *International Symposium on IT in Medicine and Education IT in Medicine and Education (ITME)*, 1, 445-448.
- HUANG, H., GONG, P., CLINTON, N. y HUI, F. (2008). Reduction of atmospheric and topographic effect on Landsat TM data for forest classification. *International Journal of Remote Sensing*, 29, 5623-5642.
- HUANG, W., ZHANG, L.P. y LI, P.X. (2005). An improved topographic correction approach for satellite image. *J. Image Graph.* 10, 1124–1128.
- HUETE, A.R., JACKSON, R.D. y POST, D.F. (1985). Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds, *Remote Sensing of Environment*, 17(1), 37–53.
- HUETE, A.R. (1988). A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25, 295-309.
- HUETZ, A.L. (1969). Le climat des Îles Canaries. *Société d'édition d'enseignement supérieur*. París. 224 pp.
- IGLESIAS, M.R., BARCHUK, A. y GRILL, M.P. (2010). Dinámica estacional e interanual del NDVI en bosques nativos de zonas áridas argentinas. *Revista de Teledetección*, 34, 44-54.
- IVERSON, L.R., COOK, E.A. y GRAHAM, R.L. (1989). A technique for extrapolating and validating forest cover across large regions: calibrating AVHRR data with TM data. *International Journal of Remote Sensing*, 10, 1805–1812.
- JÄÄSKELÄINEN, E., MANNINEN, T., TAMMINEN, J. y LAINE, M. (2017). The Aerosol Index and Land Cover Class Based Atmospheric Correction Aerosol Optical Depth Time Series 1982–2014 for the SMAC Algorithm. *Remote Sens.*, 9, 1095.

- JACKSON, R.D., SLATER, P.N. y PINTER, P.J. (1983). Discrimination of growth and water stress in wheat by various vegetation indices through clear and turbid atmospheres. *Remote Sensing of Environment*, 13, 187-208.
- JACQUEMOUD, S. y BARET, F. (1990). PROSPECT: a model of leaf optical properties spectra. *Remote Sensing of Environment*, 34, 75-91.
- JACQUEMOUD, S., BARET, F., ANDRIEU, B., DANSON, F.M. y JAGGARD, K. (1995). Extraction of vegetation biophysical parameters by inversion of the PROSPECT+SAIL models on sugar beet canopy reflectance data. Application to TM and AVIRIS sensors. *Remote Sensing of the Environment*, 52, 163-172.
- JANZEN, D.T., FREDEEN, A.L. y WHEATE, R.D. (2006). Radiometric correction techniques and accuracy assessment for Landsat TM data in remote forested regions. *Can. J. Remote Sens.*, 32, 330–340.
- JARVIS, P.G. y LEVERENZ, J.W. (1983). Productivity of temperate, deciduous and evergreen forests, In: *Physiological Plant Ecology IV*. Ecosystem processes: mineral cycling, productivity and man's influence. Lange, O. L.; Nobel, P. S.; Osmond, C. B. y Ziegler, H. (Eds.). Springer-Verlag, Berlin. 233-280.
- JIANG, Z. y HUETE, A.R. (2010). Linearization of NDVI Based on its Relationship with Vegetation Fraction. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 76 (8), 965–975.
- JIMÉNEZ, M. y DÍAZ-DELGADO, R. (2015). Towards a Standard Plant Species Spectral Library Protocol for Vegetation Mapping: A Case Study in the Shrubland of Doñana National Park. *ISPRS International Journal Geo-Information*, 4, 2472-2495.
- JOHNSON, D.D. y MILLER, R.F. (2006). Structure and development of expanding western juniper woodlands as influenced by two topographic variables. *Forest Ecology and Management*, 229, 7-15.
- JONES, H.G. (1992). Plants and microclimate. (2ª ed) Cambridge University Press, Cambridge, pp. 428.
- JONES, H.G. y VAUGHAN, R.A. (2010). Remote sensing of vegetation. Oxford University Press., New York, NY, USA.
- JORDAN, C.F. 1969. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor. *Ecology*, 50, 663-666.
- JUSTICE, C.O. y TOWNSHEND, J.R.G. (1981). The use of Landsat data for land cover inventories of Mediterranean lands. *Terrain Analysis and Remote Sensing*. Londres, George Allen and Unwin:135-153.

- KÄMMER, F. (1976a). The influence of man on the vegetation of the island of Hierro (Canary Islands). In: G. Kunkel (Ed.). Biogeography and ecology in the Canary Islands. *Monogr. Biol.*, 30: 327-346.
- KÄMMER, F. (1976b). *Tolpis glabrescens* Kammer, eine neue Compositen-Art aus -Makaronesien / *Tolpis glabrescens* Kammer, a new species of Compositae from Macaronesia. *Botanische Jahrbücher für Systematik, Pflanzengeschichte und Pflanzengeographie*, 97 (1), 155-160.
- KANE, V.R., GILLESPIE, A.R., McGAUGHEY, R., LUTZ, J.A., CEDER, K. y FRANKLIN, J.F. (2008). Interpretation and topographic compensation of conifer canopy self-shadowing. *Remote Sensing of Environment*, 112, 3820–3832.
- KAPNIAS, D., MILENOV, P. y KAY, S. (2008). Guidelines for Best Practice and Quality Checking of Ortho Imagery. *OPOCE*.
- KAUFMAN, Y.J. y TANRÉ, D. (1992). Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(2), 261–270.
- KAUFMAN, Y.J. (1993). Aerosol optical thickness and atmospheric path radiance. *Journal of Geophysical Research*, 98, 2677–2692.
- KAUFMAN, Y.J., WALD, A., LORRAINE, L.A., GAO, B.C., LI, R.R. y FLYNN, L. (1997). Remote sensing of aerosol over the continents with the aid of a 2.2 μ m channel. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35, 1286–1298.
- KERR, J.T. y OSTROVSKY, M. (2003). From space to species: Ecological applications for remote sensing. *Trends in Ecology and Evolution*, 78, 1-7.
- KING, M.D., KAUFMAN, Y.J., TANRÉ, D. y NAKAJIMA, T. (1999). Remote Sensing of Tropospheric Aerosols from Space: Past, Present and Future. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 80: 2229-2259.
- KLEINER, L.E. y GILMAN, C. Physical Oceanography Animations. Coastal Carolina University. <<https://ci.coastal.edu/~lkeiner/Animations/Images/Electromagnetic-Spectrum-3.png>> [Última consulta: 18/07/1018].
- KNEIZYS, F.X., SHETTLE, E.P., ABREU, L.W., CHETWYND, J.H., ANDERSON, G.P., GALLERY, W.O., SELBY, J.E.A. y CLOUGH, S.A. (1988). User's guide to LOWTRAN-7. *Air Force Geophysics Laboratory*, Hanscom, MA.
- KOBAYASHI, S. y SANGA-NGOIE, K. (2008). The integrated radiometric correction of optical remote sensing imageries. *International Journal of Remote Sensing*, 29, 5957-5985.
- KOKALY, R.F., ASNER, G.P., OLLINGER, S.V., MARTIN, M.E. y WESSMAN, C.A. (2009). Characterizing canopy biochemistry from imaging spectroscopy and its application to ecosystem studies. *Remote Sensing of Environment* (Supplement 1), S78–S91.

- KOTCHENOVA, S.Y., VERMOTE, E.F., MATARRESE, R. y KLEMM Jr. F.J. (2006). Validation of a vector version of the 6S radiative transfer code for atmospheric correction of satellite data. Part I: Path radiance. *Appl. Opt.*, 45(26), 6762–6774.
- KOTCHENOVA, S.Y. y VERMOTE, E.F. (2007). Validation of a vector version of the 6S radiative transfer code for atmospheric correction of satellite data. Part II. Homogeneous Lambertian and anisotropic surfaces. *Appl. Opt.*, 46(20), 4455–4464.
- KYUN, I.A. (1997). Tratamiento digital de imágenes Landsat5-TM y ERS-1 SAR para la clasificación de modelos de combustible. Trabajo de investigación. Universidad de Alcalá de Henares. Alcalá de Henares. 141 pp.
- LABOVITZ, M.L. y MARVIN, J.W. (1986): Precision in geodetic correction of TM data as a function of the number, spatial distribution, and success in matching control points: a simulation. *Remote Sensing of Environment*, 20, 237-252.
- LABRANDERO, J.L. (1978). Aplicación de métodos digitales al reconocimiento de suelos mediante sensores remotos. Departamento de Geología, Madrid. Universidad Autónoma de Madrid.
- LAMBIN, E.F. y GEIST, H.J., eds. (2006). Land-Use and Land-Cover Change: Local Processes and Global Impacts. Berlin: *Springer-Verlag*. 222 pp.
- LAURIN, G.V., PIROTTI, F., CALLEGARI, M., CHEN, Q., CUOZZO, G., LINGUA, E., NOTARNICOLA, C. y PAPAIE, D. (2016). Potential of ALOS2 and NDVI to estimate forest above-ground biomass, and comparison with Lidar-derived estimates. *Remote Sensing*, 9(1), 18
- LAVREAU, J. (1991): De-hazing Landsat Thematic Mapper images. *Photogramm. Eng. Remote Sensing*, 57, 1297–1302.
- LAW, K.H. y NICHOL, J. (2004). Topographic correction for differential illumination effects on IKONOS satellite imagery. *The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*, 641–646.
- LE MAIRE, G., FRANÇOIS, C., SOUDANI, K., BERVEILLER, D., PONTAILLER, J., BRÉDA, N., GENET, H., DAVI, H. y DUFRÊNE, E. (2008). Calibration and validation of hyperspectral indices for the estimation of broadleaved forest leaf chlorophyll content, leaf mass per area, leaf area index and leaf canopy biomass. *Remote Sensing of Environment*, 112, 3846-3864.
- LEHNERT, L.W., MEYER, H., WANG, Y., MIEHE, G. y THIES, B. (2015). Retrieval of grassland plant coverage on the Tibetan Plateau based on a multi-scale, multi-sensor and multi-method approach. *Remote Sensing of Environment*, 164, 197-207.
- LEPRIEUR, C.E., DURAND, J.M. y PEYRON, J.L. (1988). Influence of topography on forest reflectance using Landsat Thematic Mapper and digital terrain data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54(4), 491-496.

- LEPRIEUR, D., VERSTRAETE, M.M. y PINTY, B. (1994). Evaluation of the performance of various vegetation indices to retrieve cover from AVHRR data. *Remote Sensing Reviews*, 10, 265-284.
- LI, X., WANG, S.G., GE, Y., JIN, R., LIU, S.M., MA, M.G., SHI, W.Z., LI, R.X. y LIU, Q.H. (2013). Development and experimental verification of key techniques to validate remote sensing products. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sensing Spat. Inf. Sci.*, XL-2/W1, 25–30.
- LIANG, S., FALLAH-ADLL, H., KALLURI, S., JAJA, J., KAUFMAN, Y.J. y TOWNSHEND, J.R.G. (1997). An operational atmospheric correction algorithm for Landsat Thematic Mapper imagery over the land. *Journal of Geophysical Research*, 102, 17, 173-17, 186.
- LIANG, S., FANG, H. y CHEN, M. (2001). Atmospheric correction of Landsat ETM+ land surface imagery — Part I: Methods. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39, 2490–2498.
- LIANG, S.L., LI, X.W. y WANG, J.D. (2012). Leaf area index. In *Advanced Remote Sensing: Terrestrial Information Extraction and Applications*. Science Press: Beijing, China, 11, 342–344.
- LILLESAND, T.M., KIEFER, R.W. y CHIPMAN, J.W. (2008). *Remote Sensing and image interpretation*. Wiley, 6ª edición.
- LIN, C., WU, C., TSOGT, K., OUYANG, Y. y CHANG, C. (2015). Effects of atmospheric correction and pansharpening on LULC classification accuracy using WorldView-2 imagery. *Information Processing in Agriculture*, 2, 25-36.
- LONG, T., JIAO, W. y JIA, X. (2010). A New Method for Automatic Gross Error Detection in Remote Sensing Image Geometric Correction. *Seventh International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD)*, 4: 1940-1945.
- LONGPRÉ, M.A., CHADWICK, J.P., WIJBRANS, J. y IPING, R. (2011). Age of the El Golfo debris avalanche, El Hierro (Canary Islands): new constraints from laser and furnace $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 203, 76-80
- LÓPEZ SERRANO, P.M., CORRAL RIVAS, J.J., DÍAZ VARELA, R.A., ÁLVAREZ GONZÁLEZ, J.G. y LÓPEZ SÁNCHEZ, C.A. (2016). Evaluation of radiometric and atmospheric correction algorithms for aboveground forest biomass estimation using Landsat 5 TM data. *Remote Sensing*, 8, 369.
- LOSADA, A., BELTRAN, E., HERNÁNDEZ PADRÓN, C. y WILDPRET de la TORRE, W. (1984). Contribución al estudio de los briófitos epífitos de *Juniperus phoenicea* en la isla de El Hierro (I. Canarias). *Anales de Biología*, 2(sección especial 2), 307-317. Secretariado de publicaciones. Universidad de Murcia.
- LU, D., MAUSEL, P., BRONDIZIO, E. y MORAN, E. (2002). Assessment of atmospheric correction methods for Landsat TM data applicable to Amazon basin LBA research. *International Journal of Remote Sensing*, 23, 2651–2671.

- LU, D., GE, H., HE, S., XU, A., ZHOU, G. y DU, H. (2008). Pixel-based minnaert correction method for reducing topographic effects on a Landsat 7 ETM+ image. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 74, 1343–1350.
- LU, D. y WENG, Q. (2009). Extraction of urban impervious surfaces from IKONOS imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 30, 1297–1311.
- LUSCH, R. (1989). Spectral characteristics of land surfaces. *Current Trends in Remote Sensing Education* (ed. M.D. Nellis, R. Lougeay, K. Lulla), Hong-Kong, Geocarto International Centre, 81-86.
- MANRIQUE, E.G. (1999). Índice de vegetación. Aplicación del NDVI. *Teledetección. Avances y aplicaciones*. VIII Congreso Nacional de Teledetección, Albacete, España, 217-219.
- MARCELLO, J., EUGENIO, F., PERDOMO, U. y MEDINA, A. (2016). Assessment of Atmospheric Algorithms to Retrieve Vegetation in Natural Protected Areas Using Multispectral High-resolution. *Imagery Sensors*, 16, 1624.
- MARINO, E., RANZ, P., TOMÉ, J.L., NORIEGA, M.A., ESTEBAN, J. y MADRIGAL, J. (2016). Generation of high-resolution fuel model maps from discrete airborne laser scanner and Landsat-8 OLI: A low-cost and highly updated methodology for large areas. *Remote Sensing of Environment*, 187, 267–280.
- MARTIN FERNÁNDEZ, C.S. (2009). Sociedad y sequía en un territorio insular (EL HIERRO, CANARIAS) *Scripta Nova* Vol. XIII, núm. 302.
- MARTIN, J., MEDINA, A., EUGENIO, F., MARCELLO, J., BERMEJO, J.A. y ARBELO, M. (2012). Atmospheric Correction for high-resolution images WorldView-2 using 6S model, a case study in the Canary Islands, Spain. *In Proceedings of the SPIE Remote Sensing Europe*, Edinburgh, UK, 24–27 September.
- MARZOL JAÉN, M.V. (1988). La lluvia: Un recurso natural para Canarias. Pp. 220. Santa Cruz de Tenerife.
- MARZOL JAÉN, M.V. (2000). El clima. In: Morales Matos, G. & Pérez González, R. (eds.). Gran Atlas Temático de Canarias. *Ed. Interinsular Canaria. Sta. Cruz de Tenerife*. 87-106
- MASELLI, F. y CHIESI, M. (2006). Evaluation of statistical methods to estimate forest volume in a Mediterranean region. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44, 2239–2250.
- MASSON, D.G., WATTS, A.B., GEE, M.J.R., URGELES, R., MITCHELL, N.C., Le BAS, T.P. y CANALS, M. (2002). Slope failures on the flanks of the western Canary Islands. *Earth-Science Reviews*. 57, 1-35.
- MATHER, P.M. (1995). Map-image registration using least-squares polynomials. *International Journal of Geographical Information Systems*, 9, 5, 543-554.

- MATHER, P.M. y KOCH, M. (2011). Computer Processing of Remotely-Sensed Images. *Wiley-Blackwell*, Chichester, 121-124.
- MATHER, P.M. y KOCH, M. (2012). Computer processing of remotely-sensed images. An introduction (4^a ed.). Wiley-Blackwell. Chichester.
- McDONALD, E.R., WU, X., CACCETTA, P.A. y CAMPBELL, N.A. (2000). Illumination correction of Landsat TM data in south east NSW. *Proceedings of the Tenth Australasian Remote Sensing Conference*.
- MEYER, P., ITTEN, K. I., KELLENBENBERGER, T., SANDMEIER, S. y SANDMEIER, R. (1993). Radiometric corrections of topographically induced effects on Landsat TM data in an alpine environment. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 48, 17-28.
- MILTON, E.A., SCHAEPMAN, M.E., ANDERSON, K., KNEUBÜHLER, M. y FOX, N.. (2009). Progress in field spectroscopy. *Remote Sensing of Environment*, 113, 92-109.
- MINNAERT, M. (1941). The reciprocity principle in lunar photometry. *The astrophysical journal*, 93, 403-410.
- MITCHELL-TOMÉ, R. (1976). Geology of the Middle Atlantic Islands. *Beitr. Region. Geol. Erde*, 12, pp382.
- MITRI, G.H. y GITAS, I.Z. (2004). A performance evaluation of a burned area object-based classification model when applied to topographically and non-topographically corrected TM imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 25, 2863-2870.
- MIURA, H. y MIDORIKAWA, S. (2006). Updating GIS building inventory data using high-resolution satellite images for earthquake damage assessment: Application to metro Manila, Philippines. *Earthquake Spectra*, 22, 151-168.
- MONTESINOS, F.G., ARNOSO, J., BENAVENT, M. y VIEIRA, R. (2006). The crustal structure of El Hierro (Canary Islands) from 3-D gravity inversión. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 150,283-299.
- MORAN, M.S., JACKSON, R.D., SLATER, P.N. y TEILLET, P.M. (1992). Evaluation of simplified procedures for retrieval of land Surface reflectance factors from satellite sensor output. *Remote Sensing of Environment*, 41, 169-184.
- MONTESINOS, D., OTTO, R. y FERNÁNDEZ PALACIOS, J. M. (2009). 9560 Bosques endémicos de *Juniperus* spp. En: VV.AA., Bases ecológicas preliminares para la conservación de los tipos de hábitat de interés comunitario en España. Madrid: *Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino*. Madrid. 84 pp.
- MORALES, G. y SANTANA, A. (2005). Las Islas Canarias: territorio y sociedad. Las Palmas de Gran Canaria. Ed. Anroart.

- MORÉ, G. y PONS, X. (2012). Influence of the nature and number of ground control points to the quality of remote sensing geometric corrections. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2356-2359.
- MYNENI, R.B., ROSS, J. y ASRAR, G. (1989). A review on the theory of photon transport in leaf canopies. *Agricultural and Forest Meteorology*, 45, 1-153.
- MYNENI, R.B. y ROSS, J. (1991). Photon-vegetation interactions: applications in optical remote sensing and plant physiology. *Springer-Verlag*, Berlín, pp. 560.
- NAGENDRA, H. y ROCCHINI, D. (2008). High-resolution satellite imagery for tropical biodiversity studies: The devil is in the detail. *Biodiv. Conserv.* 17: 3431–3442.
- NAVARRO, A. y SOLER, C. (1995). El agua en El Hierro. Cabildo Insular de El Hierro, pp. 97.
- NAVARRO-CERRILLO, R.M. (2013). Evaluación de variables biofísicas mediante teledetección en pinares mediterráneos. *Ambienta*, 105.
- NAZEER, M., NICHOL, J. y YUNG, Y. (2014). Evaluation of atmospheric correction models and Landsat surface reflectance product in an urban coastal environment. *International Journal of Remote Sensing*, 35, 16, 6271–6291.
- NEMANI, R. R., PIERCE, L., RUNNING, S. W. y BAND, L. (1993). Forest ecosystem processes at the watershed scale: Sensitivity to remotely-sensed leaf area index estimates. *Int. J. Remote Sens.*, 14, 2519–2534.
- NGUYEN, H.C., JUNG, J., LEE, J., CHOI, S.U., HONG, S.Y. y HEO, J. (2015): Optimal Atmospheric Correction for Above-Ground Forest Biomass Estimation with the ETM+ *Remote Sensor. Sensors*, 15, 18865–18886.
- NIELSEN, A.A., CONRADSEN, K. y SIMPSON, J.J. (1998). Multivariate alteration detection (MAD) and MAF post-processing in multispectral, bitemporal image data: New approaches to change detection studies. *Remote Sensing of Environment*, 64, 1–19.
- NIEMANN, O. (1991). Landscape drainage modelling to enhance Landsat classification accuracies. *Geocarto International*, 6, 1, 13-30.
- NOGALES, M., PADRÓN, B. y MARRERO, P. (2009). Germination patterns throughout an insular altitudinal gradient: The case of the Macaronesian endemic plant *Rubia fruticosa* Ait. (Rubiaceae) in El Hierro (Canary Islands). *Flora - Morphology Distribution Functional Ecology of Plants*, 204, 7, 543-548.
- OLANO, J.M., ROZAS, V., BARTOLOMÉ, D. y SANZ, D. (2008). Effects of changes in traditional management on height and radial growth patterns in a *Juniperus thurifera* L. Woodland. *Forest Ecology and Management*, 255, 506-512.

- OTTO, R., KRÜSI, B.O., DELGADO, J.D., FERNÁNDEZ-PALACIOS, J.M., GARCÍA-DEL-REY, E. y ARÉVALO, J.R. (2010). Regeneration niche of the Canarian juniper: the role of adults, shrubs and environmental conditions. *Ann. For. Sci.*, 67, 709.
- OUAIDRARI, H. y VERMOTE, E. F. (1999). Operational atmospheric correction of Landsat TM data. *Remote Sensing of Environment*, 7, 4–15.
- OZDEMIR, I. (2008). Estimating stem volume by tree crown area and tree shadow area extracted from pan sharpened Quickbird imagery in open Crimean juniper forests. *International Journal of Remote Sensing*, 29, 19, 5643-5655,
- PACIFICI, F. (2013). An automatic atmospheric compensation algorithm for very high spatial resolution imagery and its comparison to FLAASH and QUAC. In Proceedings of the Joint Agency Commercial Imagery Evaluation (JACIE) Workshop, Saint Louis, MO, USA, 16–18 April.
- PALÀ, V. y PONS, X. (1995). Incorporation of relief in polynomial-based geometric corrections. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 61, 935-944.
- PEARSON, R.L. y MILLER, L.D. (1972). Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the short-grass prairie, Pawnee National Grasslands, Colorado, 1357-1381. Ann Arbor, MI: ERIM.
- PELLICER, M.J. (1977). Estudio volcanológico de la isla de El Hierro (Islas Canarias). *Estudios geológicos.*, 33, 181-197.
- PENG, D., JIANG, Z., HUETE, A.R., PONCE, G.E., NGUYEN, U. y LUVAL, J.C. (2013). Response of Spectral Reflectances and Vegetation Indices on Varying Juniper Cone Densities. *Remote Sens.*, 5, 5330-5345.
- PEÑUELAS, J., PIÑOL, J., OGAYA, R. y FILELLA, I. (1997). Estimation of plant water concentration by the reflectance Water Index WI (R900/R970). *International Journal of Remote Sensing*, 18, 13, 2869-2875.
- PETTORELLI, N., VIK, J.O., MYSTERUD, A., GAILLARD, J.M., TUCKER, C.J. y STENSETH, N.C. (2005). Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology & Evolution*, 20, 503–510.
- PHEH. Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica de El Hierro, 1^{er} Ciclo 2009-2015 (2012). Consejo Insular de Aguas de El Hierro.
- PHEH. Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica de El Hierro, 2^o Ciclo 2015-2021 (2017). Consejo Insular de Aguas de El Hierro.
- PIAZZESE, J. y OÑATE, E. (2004). Metodología para la obtención de información geográfica, geofísica y geo-ambiental desde imágenes satelitales. < https://www.scipedia.com/public/Piazzese_Oñate_2003a> [Última consulta: 15/06/2018].

- POITRAS, T.B., VILLARREAL, M.L., WALLER, E.K., NAUMAN, T.W., MILLER, M.E. y DUNIWAY, M.C. (2018). Identifying optimal remotely-sensed variables for ecosystem monitoring in Colorado Plateau drylands. *Journal of Arid Environments*, 153, 76-87.
- PONS, X. y SOLÉ-SUGRAÑES, L. (1994). A simple radiometric correction model to improve automatic mapping of vegetation from multispectral satellite data. *Remote Sensing Environmental*, 48, 191-204.
- PONS, X., MORÉ, G. y PESQUER, L. (2010). Automatic matching of LANDSAT image series to high resolution orthorectified imagery. *Proc. 'ESA Living Planet Symposium'*, Bergen, Norway 28 June – 2 July.
- PONS, X., PESQUER, L., CRISTÓBAL, J. y GONZÁLEZ, O. (2014). Automatic and Improved Radiometric Correction of Landsat Imagery Using Reference Values from MODIS Surface Reflectance Images. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 33, 243-254.
- PRIETO, J.A., VILLARREAL, F., MARTINEZ, M., MANJARREZ, C., SANTELLANO, E. y PINEDO, A. (2018). Atmospheric and Radiometric Correction Algorithms for the Multitemporal Assessment of Grasslands Productivity. *Remote Sensing*, 10, 219.
- PRINCE, S.D. (1991). A model of regional primary production for use with coarse-resolution satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 12, 1313-1330.
- PROY, C., TANRÉ, D. y DESCHAMPS, P.Y. (1989). Evaluation of topographic effects in remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 30, 21-32.
- PU, R., LANDRY, S. y ZHANG, J. (2015). Evaluation of Atmospheric Correction Methods in Identifying Urban Tree Species with WorldView-2 Imagery. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sensing*, 8, 1886-1897.
- QI, J., CHEHBOUNI, A., HUETE, A.R., KERR, Y.H. y SOROOSHIAN, S. (1994). A Modified Soil Adjusted Vegetation Index. *Remote Sensing Environment*, 48, 119-126.
- RAHMAN, H. y DEDIEU, G. (1994). SMAC: a simplified method for the atmospheric correction of satellite measurements in the solar spectrum. *International Journal of Remote Sensing*, 15, 123-143.
- REEDER, D.H. (2002). Topographic Correction of Satellite Images: Theory and Application (Ph.D. Dissertation). Dartmouth College, Hanover, New Hampshire, 153 pp.
- REES, W. G. (1990). Physical Principles of Remote Sensing. *Cambridge University Press*: 247 pp.
- REES, W.G. (2001). Physical principles of remote sensing. (2^a ed). *Cambridge University Press*. Cambridge.

- REESE, H. y OLSSON, H. (2011). C-correction of optical satellite data over alpine vegetation areas: a comparison of sampling strategies for determining the empirical C-parameter. *Remote Sensing of Environment*, 115, 6, 1387–1400.
- REICHSTEIN, M., TENHUNEN, J., ROUPSARD, O., OURCIVAL, J.M., RAMBAL, S., MIGLIETTA, F., PERESSOTTI, A., PECCHIARI, M., TIRONE, G. y VALENTINI, R. (2003). Inverse modeling of seasonal drought effects on canopy CO₂/H₂O exchange in three Mediterranean ecosystems. *Journal of Geophysical Research*, 10, 108 (D23), 4726.
- RIAÑO, D., SALAS, J. y CHUVIECO, E. (2000). Corrección Atmosférica y Topográfica, Información Multitemporal y Auxiliar Aplicadas a la Cartografía de Modelos de Combustibles con Imágenes Landsat-TM. *Tecnologías Geográficas para el Desarrollo Sostenible*. Departamento de Geografía. Universidad de Alcalá, 222-239.
- RIAÑO, D., CHUVIECO, E., SALAS, J. y AGUADO, I. (2003). Assessment of Different Topographic Corrections in Landsat-TM Data for Mapping Vegetation Types. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41, 5, 1056-1061.
- RICHARDS, J.A. y JIA, X. (2005). *Remote Sensing Digital Image Analysis. An Introduction*, (4^a ed), Springer-Verlag, Berlín.
- RICHARDSON, A.J. y WIEGEND, C.I. (1977). Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogramm. Eng. Rem. S.* 43, 1541-1552.
- RICHTER, R. (1990). A fast atmospheric correction algorithm applied to Landsat TM images. *International Journal of Remote Sensing*, 11, 159–166.
- RICHTER, R. (1996). A spatially adaptive fast atmospheric correction algorithm. *Int. J. Remote Sens.*, 17, 1201–1214.
- RICHTER, R. (1998). Correction of satellite imagery over mountainous terrain. *Optical Society of America*, 37(18), 4004-4015
- RICHTER, R., KELLENBERGER, T. y KAUFMANN, H. (2009). Comparison of topographic correction Methods. *Remote Sensing*, 1, 184–196.
- ROBERTS, D.A., USTIN, S.L., OGUNJEMIYO, S., GREENBERG, J., DOBROWSKI, S.Z. y CHEN, J. (2004). Spectral and structural measures of Northwest forest vegetation at leaf to land-scape scales. *Ecosystems*, 7, 545-562.
- ROBIN, M. (1995). *La Télédétection. Des satellites aux systèmes d'information géographiques*. Ed. Nathan, Col. Fac Géographie, 320 pp.
- RODRIGUEZ-GALIANO, V.F., GHIMIRE, B., ROGAN, J., CHICA-OLMO, M. y RIGOL-SÁNCHEZ, J.P. (2012). An assessment of the effectiveness of a random forest classifier for land-cover classification. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 67, 93–104.

- ROKHMATULOH, NITTO, D., AL-BILBISI, H., y TATEISHI, R. (2005). Percent tree cover estimation using regression tree method: a case study of Africa with very-high resolution QuickBird images as training data. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS*, 3, 2157– 2160.
- ROMO, A. y SALVÀ-CATARINEU, M. (2013). Phytodiversity of the remnants of Canarian endemic juniper woodlands on El Hierro, Canary Islands. *Ecología Mediterránea*, 39, 191-199.
- ROMO, A., BORATYNSKI, A. y SALVÀ-CATARINEU, M. (2014). Diversidad funcional de los sabinares en una isla oceánica: El Hierro, Islas canarias. *Biogeografía de Sistemas Litorales. Dinámica y Conservación*.
- RONDEAUX, G., STEVEN, M. y BARET, F. (1996). Optimization of Soil-Adjusted Vegetation Indices. *Remote Sensing Environment*, 55, 95-107.
- RORIE, R.L., PURCELL, L.C., MOZAFFARI, M., KARCHER, D.E., KING, C.A., MARSH, M.C. y LONGER, D.E. (2011). Association of greenness in corn with yield and leaf nitrogen concentration. *Agron. J.*, 103, 529–535.
- ROSS, J. (1981). The radiation regime and architecture of plant stands. Dr W Junk, The Hague, pp. 391.
- ROUJEAN, J.L. y BREON, F.M. (1995). Estimating PAR Absorbed by Vegetation from Bidirectional Reflectance Measurements. *Remote Sensing of Environment*, 51, 375-384.
- ROUSE, J.W., HAAS, R.H., SCHELL, J.A. y DEERING, D.W. (1973). Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. Proceedings, 3rd *Earth Resources Technology Satellite Symposium*, NASA SP-351, I, 309-317.
- ROUSE, J.W., HAAS, R.H., SCHELL, J.A., DEERING, D.W. y HARLAN, J.C. (1974). Monitoring the vernal advancement of retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation. NASA/GSFC, Type III, Final Report, Greenbelt, MD, USA, 1-371.
- RUNNING, S.W. y COUGHLAN, J.C. (1988). A general-model of forest ecosystem processes for regional applications. Hydrologic balance, canopy gas-exchange and primary production processes. *Ecological Modelling*, 42, 125-154.
- SÁ, A.C.L., PEREIRA, J.M.C., VASCONCELOS, M.J. y SILVA, J.M.N. (2003). Burned area mapping in the Miombo of northern Mozambique using MODIS and Landsat data.. *International Journal of Remote Sensing*, 24, 1783–1796.
- SALVÀ-CATARINEU y M., ROMO, A. (2008). Uso de TIG para la conservación del sabinar de *Juniperus turbinata Subsp. Canariensis* en la isla de El Hierro. En: Hernández, L. y Parreño, J. M. (Eds.), *Tecnologías de la Información Geográfica para el Desarrollo Territorial*. Servicio de Publicaciones y Difusión Científica de la ULPGC. Las Palmas de Gran Canaria, 766-776.
- SALVÀ-CATARINEU, M., ROMO DÍEZ, A. y SALVADOR FRANCH, F. (2012). Estructura de edad y biodiversidad de los sabinares de *Juniperus turbinata* Guss. en El Hierro (Islas Canarias).

- In: Cunill, R.; Pèlachs, A.; Pérez-Obiol, R. & Soriano, J.M. (eds.). *Las zonas de montaña: gestión y biodiversidad (Actas VII Congreso Español de Biogeografía. Planes de Son, Pirineo, sept.2012)*. UAB. Barcelona, 40-45.
- SALVÀ-CATARINEU, M., ROMO, A., SALVADOR FRANCH, F., CORTÉS LUCAS, A., PADRÓN PADRÓN, P.A., BORATYNSKI, A., RODRÍGUEZ OLLER, A. y LÓPEZ BUSTINS, J.A. (2014a). Estructura y características ambientales de los sabinares de *Juniperus turbinata* Guss. en la isla de El Hierro (Islas Canarias). XIV Coloquio Ibérico de Geografía. 11-14 Noviembre, Guimerao, Portugal.
- SALVÀ-CATARINEU, M., SALVADOR FRANCH, F., PADRÓN PADRÓN, P.A., CORTÉS LUCAS, A. y LÓPEZ BUSTINS, J.A. (2014b). Termohigrometría del aire y del suelo de los sabinares de la Isla de El Hierro (Canarias). In: S. Fernández-Montes & F.S. Rodrigo (eds.). *Cambio Climático y Cambio Global (IX Congreso de la AEC, Almería, 2014)*. Publicaciones de la Asociación Española de Climatología, serie A, 9. AEC., 779-788.
- SALVÀ-CATARINEU, M., SALVADOR FRANCH, F., LÓPEZ BUSTINS, J.A., PADRÓN PADRÓN, P.A. y CORTÉS LUCAS, A. (2015). Study of the thermohygrometric conditions of *Juniperus turbinata* habitat in the island of El Hierro (Canary Islands). In: *Geophysical Research Abstracts.*, 17: 13363. European Geosciences Union (EGU) General Assembly. Viena.
- SALVÀ-CATARINEU, M., LÓPEZ BUSTINS, J.A., SALVADOR FRANCH, F., PADRÓN PADRÓN, P.A. y CORTÉS LUCAS, A. (2016a). Contrastes extremos de termohigrometría en la Isla de El Hierro (Islas Canarias). In: Olcina Cantos, J.; Rico Amorós, A.M. & Moltó Mantero, E. (eds.). *Clima, sociedad, riesgos y ordenación del territorio (X Congreso de la AEC. Alacant, oct.2016)*. Publicaciones de la Asociación Española de Climatología, serie A, 10., 355-363.
- SALVÀ-CATARINEU, M., SALVADOR FRANCH, F., LÓPEZ BUSTINS, J.A., PADRÓN PADRÓN, P.A. y CORTÉS LUCAS, A. (2016b). On the detection of thermohygrometric differences of *Juniperus turbinata* habitat between north and south faces in the island of El Hierro (Canary Islands). In: *Geophysical Research Abstracts*. Vol. 18: 8722. European Geosciences Union (EGU) General Assembly. Viena.
- SALVÀ-CATARINEU, M., DOMÍNGUEZ-SEGARRA, M. y CAMPO-MORENO, S. (2018). Rectificación geométrica, corrección atmosférica y topográfica en la isla de El Hierro (Islas Canarias) con imagen de satélite GeoEye-1. XVIII Congreso Nacional TIG, 20-22 junio, Valencia.
- SALVADOR, R., PONS, X. y DIEGO, F. (1996). Validación de un método de corrección radiométrica sobre diferentes áreas montañosas. *Revista de Teledetección*, 7, 3-7.
- SANDMEIER, S. y ITTEN, K.I. (1997). A physically-based model to correct atmospheric and illumination effects in optical satellite data of rugged terrain. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35, 708-717.
- SANTAMARTA, J.C., et al. (2013). Hidrología y recursos hídricos en islas y terrenos volcánicos. *Colegio de ingenieros de Montes*, Tenerife, pp. 554.
- SANTOS, A. (1976). Notas sobre la vegetación potencial de la isla de El Hierro (1). *Análisis instituto botánico Cavanilles*, 33, 249-261.

- SCHAAF, C.B., LI, X. y STRAHLER, A.H. (1994). Topographic Effects on Bidirectional and Hemispherical Reflectances Calculated with a Geometric-Optical Canopy Model. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 32, 6.
- SCHMIDT, H. y KARNIRLI, A. (2000). Remote sensing of the seasonal variability of vegetation in a semi-arid environment. *Journal of Arid Environments*, 45, 43–59.
- SCHOTT, J.R., SALVAGGIO, C. y VOLCHOK, W.J. (1988). Radiometric scene normalization using pseudoinvariant features. *Remote Sensing of Environment*, 26, 1–16.
- SCHOWENGERDT, R.A. (1983). Techniques for image processing and classification in remote sensing. *Academic Press*, Nueva York.
- SCHROEDER, T.A., COHEN, W.B., SONG, C., CANTY, M.J. y YANG, Z. (2006). Radiometric correction of multi-temporal Landsat data for characterization of early successional forest patterns in western Oregon. *Remote Sensing of Environment*, 103, 16–26.
- SCHWEICHEL, R. (1999). Die Vegetation der Kanareninsel El Hierro: Anwendung von Fernerkundungsdaten (SPOT2). *BIS Verlag*.
- SCOTT, J.G., MARKHAM, B.L. y NEWCOMER, J.A. (1992). Radiometric Calibration and Atmospheric Correction of Satellite and Aircraft Data for FIFE. *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 1, 798-801.
- SELLERS, P.J., BERRY, J.A., COLLATZ, G.J., FIELD, C.B. y HALL, F.G. (1992). Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration III. A reanalysis using improved leaf models and a new canopy integration scheme. *Remote Sens. Environ.* 42, 187-216.
- SELLERS, P.J., DICKINSON, R.E., RANDALL, D.A., BETTS, A.K., HALL, F.G., BERRY, J.A., COLLATZ, G.J., DENNING, A.S., MOONEY, H.A., NOBRE, C.A., *et al.* (1997). Modeling the exchange of energy, water, and carbon between continents and atmosphere. *Science*, 275, 502–509.
- SERRA, P. y PONS, X. (2013). Two Mediterranean Irrigation Communities in Front of Water Scarcity: A Comparison Using Satellite Image Time Series. *Journal of Arid Environments*, 98, 41–51.
- SERRANO, L., FILELLA, I. y PEÑUELAS, J. (2000). Remote Sensing of biomass and yield of winter wheat under different nitrogen supplies. *Crop Science*, 40, 723-731.
- SHEPHERD, J.D. y DYMOND, J.R. (2003). Correcting Satellite Imagery for the Variance of Reflectance and Illumination with Topography. *International Journal of Remote Sensing*, 24, 3503–3514.
- SHEPHERD, J.D., DYMOND, J.R., GILLINGHAM, S. y BUNTING, P. (2014). Accurate registration of optical satellite imagery with elevation models for topographic correction. *Remote Sensing Letters*, 5, 637–641.

- SHORT, N.M. (1982). The Landsat Tutorial Workbook: Basics of Satellite Remote Sensing. Washington, D. C., *NASA Scientific and Technical Information Branch*.
- SHULTIS, J.K. (1991). Calculated sensitivities of several optical radiometric indices for vegetation Canopies, *Remote Sensing of Environment*, 38, 211–228.
- SIMS, D.A. y GAMON, J.A. (2002). Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. *Remote Sensing Environ.*, 81, 337–354.
- SITAYEB, T. y BELABBES, I. (2018). Landscape Change in the Steppe of Algeria South-West Using Remote Sensing. *Annals of Valahia University of Targoviste, Geographical Series*, 18, 1, 41-52.
- SMITH, G.M. y MILTON, E.J. (1999). The use of the empirical line method to calibrate remotely sensed data to reflectance. *International Journal of Remote Sensing*, 20, 2653-2662.
- SMITH, J.A., LIN, T.L. y RANSON, K.J. (1980). The Lambertian Assumption and Landsat Data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 46, 9, 1183-1189.
- SMITH, M.L., MARTIN, M.E., PLOURDE, L., y OLLINGER, S.V. (2003). Analysis of hyperspectral data for estimation of temperate forest canopy nitrogen concentration: Comparison between an airborne (AVIRIS) and a spaceborne (Hyperion) sensor. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41, 1332–1337.
- SOBRINO, J.A. (2000). Teledetección. *Servicio de Publicaciones*, Universidad de Valencia.
- SOENEN, S.A., PEDDLE, D.R. y COBURN, C.A. (2005). SCS+C: A modified sun-canopy-sensor topographic correction in forested terrain. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(9), 2148-2159.
- SOENEN, S.A., PEDDLE, D.R., COBURN, C.A., HALL, R.J. y HALL, F.G. (2008). Improved topographic correction of forest image data using a 3-D canopy reflectance model in multiple forward mode. *International Journal of Remote Sensing*, 29, 1007-1027.
- SOLA, I., GONZÁLEZ-AUDÍCANA, M., ÁLVAREZ-MOZOS, J. y TORRES, J.L. (2014). Evaluación multitemporal de métodos de corrección topográfica mediante el uso de imágenes sintéticas multiespectrales. *Revista de teledetección*, 41, 71-78.
- SOLA, I., LIZARRAGA, M., GONZÁLEZ, M. y ÁLVAREZ, J. (2015). Efecto de errores en el co-registro entre MDT e imagen de satélite en la calidad de la corrección topográfica. *Teledetección: Humedales y Espacios Protegidos. XVI Congreso de la Asociación Española de Teledetección* (Eds. J. Bustamante, R. Díaz-Delgado, D. Aragonés, I. Afán y D. García), 273-276.
- SOLA, I., GONZÁLEZ, M. y ÁLVAREZ, J. (2016). Multi-criteria evaluation of topographic correction methods. *Remote Sensing of Environment*, 184, 247–262.

- SOMERS, B. y ASNER, G.P. (2014). Tree species mapping in tropical forests using multitemporal imaging spectroscopy: wavelength adaptive spectral mixture analysis. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, 31, 57–66.
- SONG, C., WOODCOCK, C.E., SETO, K.C., LENNEY, M.P. y MACOMBER, S.A. (2001). Classification and Change Detection Using Landsat TM Data: When and How to Correct Atmospheric Effects? *Remote Sensing of Environment*, 75, 230-244.
- SONG, C. y WOODCOCK, C.E. (2003). Monitoring forest succession with multitemporal Landsat images: Factors of uncertainty. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41, 2557–2567.
- SONG, C. (2007). Estimating tree crown size with spatial information of high resolution optical remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 28, 3305–3322.
- SORIA, D., SALOMÓN, M.A., ABRAHAM, E., *et al.* (2007). Estimación de la cobertura vegetal en el Departamento de Lavalle, Mendoza. Mar del Plata, Argentina. In: XII Congreso de la Asociación Española de Teledetección, Mar del Plata, Argentina. Valencia, Spain: Asociación Española de Teledetección, Buenos Aires, Argentina: Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires.
- SOUDANI, K., TRAUTMANN, J. y WALTER, J.M.N. (2003). Leaf area index and canopy stratification in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands. *International Journal of Remote Sensing*, 18, 3605-3618.
- STAGAKIS, S., VANIKIOTIS, T. y SYKIOTI, O. (2016). Estimating forest species abundance through linear unmixing of CHRIS/PROBA imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 119, 79-89.
- STEVEN, M. D. y JAGGARD, K. W. (1995). Advances in crop monitoring by remote sensing. In *Advances in Environmental Remote Sensing* (F. M. Danson y S. E. Plummer, Eds.), Wiley, Chichester, 143–156.
- STIERSTORFER, C. (2005). The Vascular Plant Vegetation in the Forest Belt of El Hierro (Canary Island). *Dissertationes Botanicae* 393, 1-375. J. Cramer. Berlin-Stuttgart.
- TAGESTAD, J. (2000). Radiometric standardization of adjacent Landsat Thematic Mapper Image for multi-scene mosaics. *Master of science*, Utah State University, Logan, Utah.
- TAN, B., MASEK, J.G., WOLFE, R., GAO, F., HUANG, C., VERMOTE, E.F., SEXTON, J.O. y EDERER, G. (2013). Improved forest change detection with terrain illumination corrected Landsat images. *Remote Sensing of Environment*, 136, 469–483.
- TANRE, D. y LEGRAND, M. (1991). On the satellite retrieval of Saharan dust optical thickness over land: two different approaches. *J. Geophys. Res.*, 96, 5221–5227.
- TAYLOR, B.F., DINI, P.W. y KIDSON, J.W. (1985). *Remote Sensing of Environment*, 18, 177-192.

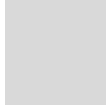
- TEILLET, P.M., GUINDON, B. y GOODENOUGH, D.G. (1982). On the slope-aspect correction of multispectral scanner data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 8(2), 84-106.
- TEILLET, P.M., FEDOSEJEVS, G. (1995). On the dark target approach to atmospheric correction of remotely sensed data. *Can. J. Remote Sensing*, 21, 374-387.
- THEMISTOCLEOUS, K. y HADJIMITSIS, D.G. (2013). Development of an image based integrated method for determining and mapping aerosol optical thickness (AOT) over urban areas using the darkest pixel atmospheric correction method, RT equation and GIS: A case study of the Limassol area in Cyprus. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 86, 1-10.
- THOMAS, N., HENDRIX, C. y CONGALTON, R.G. (2003). A comparison of urban mapping methods using high-resolution digital imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 69, 963-972.
- THUILLER, W., ARAÚJO, M.B. y LAVOREL, S. (2003). Generalized models vs. Classification tree analysis: Predicting spatial distributions of plant species at different scales. *J. Veg. Sci.* 14, 669-680.
- THUILLER, W., BROTONS, L. ARAÚJO, M.B. y LAVOREL, S. (2004). Effects of restricting environmental range data to project current and future species distributions. *Ecography*, 27, 165-172.
- TIEDE, D., HOCHLEITNE, G. y BLASCHKE, T. (2005). A full GIS-based workflow for tree identification and tree crown delineation using laser scanning. *Proceeding of the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences Workshop*, Vienna, Austria 36(3), 9-14.
- TOUTIN, T. (2003). Error tracking in IKONOS geometric processing using a 3D parametric modelling. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 69, 43-51.
- TOUTIN, T. (2004a). DTM generation from IKONOS in-track stereo images using a 3D physical model. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 70, 695-702.
- TOUTIN, T. (2004b): Geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods. *International Journal of Remote Sensing*, 25 (10), 1893-1924.
- TOWNSHEND, J.R., MASEK, J.G., HUANG, C., VERMOTE, E.F., GAO, F., CHANNAN, S., SEXTON, J.O., FENG, M., NARASIMHAN, R., KIM, D., SONG, K., SONG, D., SONG, X.P., NOOJIPADY, P., TAB, B., HANSEN, M.C., LI, M. y WOLFE, R.E. (2012). Global characterization and monitoring of forest cover using Landsat data: opportunities and challenges. *International Journal of Digital Earth*, 1-25.
- TRAVIS, B., POITRAS, T.B., VILLAREAL, M.L., WALLER, E.K., TRAVIS, W., NAUMAN, M., MILLER, E. y DUNIWAY, M.C. (2018). Identifying optimal remotely-sensed variables for ecosystem monitoring in Colorado Plateau drylands. *Journal of Arid Environment*, 153, 76-87.

- TUCKER, C.J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8, 127-150.
- TUCKER, C.J., VANPRET, C.L., SHARMAN, M.J. y VAN ITTERSUM, X (1985). Satellite remote sensing of total herbaceous biomass production in the Senegalese Sahel:1980-1984. *Remote Sensing of Environment*, 17, 233-249.
- TURNER, D.P., COHEN, W.B., KENNEDY, R.E., FASSNACHT, K.S. y BRIGGS, J.M. (1999). Relationships between Leaf Area Index and Landsat TM Spectral Vegetation Indices across Three Temperate Zone Sites. *Remote Sensing of Environment*, 70, 52-68.
- TWELE, A., KAPPAS, M., LAUER, J. y ERASMI, S. (2006). The effect of stratified topographic correction on land cover classification in tropical mountainous regions. ISPRS Comm. VII Symp., 8-11 May, Enschede, The Netherlands, 432-437.
- UNDERWOOD, E., USTIN, S. y DIPIETRO, D. (2003). Mapping nonnative plants using hyperspectral imagery. *Remote Sensing of the Environment*, 86, 150-61.
- USGS (U.S. Geological Survey) (2007). <http://calval.cr.usgs.gov/JACIE_files/JACIE07/Files/110Schus.pdf> [Última consulta: 01/07/014].
- USTIN, S.L., SMITH, M.O., JACQUEMOUD, S., VERSTRAETE, M. y GOVAERTS, Y. (1999). Geobotany: Vegetation mapping for earth sciences. A.N. Rencz (Ed.) (3rd ed.), *Remote sensing for the earth sciences: Manual of remote sensing*, 3, Wiley, New York, 189-248.
- USTIN, S.L., GITELSON, A., JACQUEMOUD, S., SCHAEPMAN, M.E., ASNER, G.P. y GAMON, J. A., *et al.* (2009). Retrieval of foliar information about plant pigment systems from high resolution spectroscopy. *Remote Sensing of Environment* (Supplement 1), 567-577.
- VANONCKELEN, S., LHERMITTE, S. y VAN ROMPAEY, A. (2013). The effect of atmospheric and topographic correction methods on land cover classification accuracy. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, 24, 9-21.
- VANONCKELEN, S., LHERMITTE, S. y VAN ROMPAEY, A. (2015). The effect of atmospheric and topographic correction on pixel-based image composites: improved forest cover detection in mountain environments. *International Journal Appl. Earth Obs.*, 35, 320-328.
- VATANDASLAR, C. y YAVUZ, M. (2017). Modeling cover management factor of RUSLE using very high-resolution satellite imagery in a semiarid watershed. *Environ. Earth. Sci.*, 76-65.
- VERAVERBEKE, S., VERSTRAETEN, W.W., LHERMITTE, S. y GOOSSENS, R. (2010). Illumination effects on the differenced Normalized Burn Ratio's optimality for assessing fire severity. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 12, 60-70.
- VERMOTE, E.F., EL SALEOUS, N.Z., JUSTICE, C.O., KAUFMAN, Y.J., PRIVETTE, J., REMER, L., ROGER, J.C. y TANRÉ, D. (1997a). Atmospheric correction of visible to middle infrared EOS-MODIS data over land surface, background, operational algorithm and validation. *Journal of Geophysical Research*, 102, 17131-17141.

- VERMOTE, E.F., TANRÉ, D., DEUZE, J.L., HERMAN, M. y MORCRETTE, J.J. (1997b). Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6 S: An overview. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35, 895–934.
- VERSTRAETE, M. (1994). The contribution of remote sensing to monitor vegetation and to evaluate its dynamic aspects. In *Vegetation, Modeling and Climatic Change Effects*, (F. Veroustraete, R. Ceulemans, et al., Eds.), SPB Academic Publishing, The Hague, The Netherlands, 207–212.
- VICENTE-SERRANO, S.M., PÉREZ-CABELLO, F. y LASANTA, T. (2008). Assessment of radiometric correction techniques in analyzing vegetation variability and change using timeseries of Landsat images. *Remote Sens. Environ.*, 112, 3916–3934.
- VIDAL-MACUA, J.J., ZABALA, A., NINYEROLA, M. y PONS, X. (2017). Developing spatially and thematically detailed backdated maps for land cover studies. *International Journal of Digital Earth*, 10 2, 175-206
- VINCINI, M., REEDER, D. y FRAZZI, E., (2002). An empirical topographic normalization method for forest TM data. In Proceedings of IGARSS 2002, 24–28 June, Toronto ON, 2091–2093.
- VINCINI, M. y FRAZZI, E., (2003). Multitemporal evaluation of topographic normalization methods on deciduous forest TM data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41, 2586-2590.
- VIÑA, A. y GITELSON, A.A. (2005). New developments in the remote estimation of the fraction of absorbed photosynthetically active radiation in crops. *Geophysical Research Letters*, 32, L17403.
- VIÑA, A., GITELSON, A.A., NGUY-ROBERTSON, A.I. y PENG, Y. (2011). Comparison of different vegetation indices for the remote assessment of green leaf area index crops. *Remote Sensing of Environment*, 115, 3468-3478.
- WANG, F., HUANG, J., TANG, Y. y WANG, X. (2007). New vegetation Index and its application in estimation Leaf Area Index of rice. *Science Direct*, 14, 195-203.
- WANG, X., JIA, K., LIANG, S., LI, Q., WEI, X., YAO, Y., ZHANG, X. y YTU, Y. (2017). Estimating Fractional Vegetation Cover from Landsat-7 ETM+ Reflectance Data Based on a Coupled Radiative Transfer and Crop Growth Model. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55, 10, 5539-5546.
- WANG, J., XIAO, X., QIN, Y., DOUGHTY, R.B., DONG, J. y ZOU, Z. (2018). Characterizing the encroachment of juniper forests into sub-humid and semi-arid prairies from 1984 to 2010 using PALSAR and Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, 205, 166-179.
- WEN, G., TSAY, S., CAHALAN, R.F. y OREOPOULOS, L. (1999). Path radiance technique for retrieving aerosol optical thickness over land. *J. Geophys. Res.* 104(D24), 31,321–31,332.
- WESTIN, T. y FORSGREN, J. (2001). Orthorectification of EROS A 1 images. *IEEEASPRS Joint Workshop on Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas (Cat. No.01EX482)*.

- WICAKSONO, P. y HAFIZT, M. (2018). Dark target effectiveness for dark-object subtraction atmospheric correction method on mangrove above-ground carbon stock mapping, *IET Image Process.*, 12, 4, 582-587.
- WILKINSON, G.G. (1996). A review of current issues in the integration of GIS and remote sensing data. *International Journal of Geographical Information Systems* 10, 85–101.
- WITTICH, K.P. y HANSING, O. (1995). *Area-averaged vegetative cover fraction estimated from satellite data. International Journal of Biometeorology*, 38, 4, 209-215.
- WU, J., WANG, D. y BAUER, M.E. (2005). Image-based atmospheric correction of QuickBird imagery of Minnesota cropland. *Remote Sensing Environ.*, 99, 315–325.
- WU, J., WANG, D. y BAUER, M.E. (2007). Assessing broadband vegetation indices and QuickBird data in estimating leaf area index of corn and potato canopies. *Field Crop Res.* 102, 33-42.
- YAN, G., MU, X. y LIU, Y. (2012). Chapter 13—Fractional vegetation cover. In *Advanced Remote Sensing*. Liang, S., Li, X., Wang, J. Eds. Academic Press: Boston, MA, USA, pp. 415–438.
- YANG, C. y VIDAL, A. (1991). Combination of digital elevation model with SPOT HRV multispectral imagery for reflectance factor mapping. *Remote Sensing of Environment*, 32, 1, 35-45.
- YANG, J., WEISBERG, P., NATHAN, J. y BRISTOW, A. (2012). Landsat remote sensing approaches for monitoring long-term tree cover dynamics in semi-arid woodlands: Comparison of vegetation indices and spectral mixture analysis. *Remote Sensing of Environment*, 119, 62–71.
- YANG, X. y LO, C.P. (2000). Relative radiometric normalization performance for change detection from multi-date satellite images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 66, 967–980.
- YANG, X., PU, R., ZHANG, J., ZHAO, C., FENG, H. y WANG, J. (2013). Remote sensing of seasonal variability of fractional vegetation cover and its object-based spatial pattern analysis over mountain areas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 77, 79-93.
- YOSHIOKA, H., MIURA, T., DEMATTÉ, J.A.M., BATCHILY, K. y HUETE, A.R. (2010). Soil line influences on two band vegetation indices and vegetation isolines: a numerical study. *Remote Sensing*, 2, 545-561.
- YUAN, D. y ELVIDGE, C.D. (1996). Comparison of relative radiometric normalization techniques. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 51, 117–126.
- ZARCO-TEJADA, P.J., MILLER, J.R., NOLAND, T.L., MOHAMMED, G.H. y SAMPSON, P.H. (2001). Scaling-up and model inversion methods with narrow-band optical indices for chlorophyll content estimation in closed forest canopies with hyperspectral data. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 39, 1491–1507.

- ZENG, Z.Y., CAO, J.Z., GU, Z.J., ZHAN, Z.L., ZHENG, W., CAO, Y.K. y PENG, H.Y. (2013). Dynamic Monitoring of Plant Cover and Soil Erosion Using Remote Sensing, Mathematical Modeling, Computer Simulation and GIS Techniques. *American Journal of Plant Sciences*, 4, 1466-1493.
- ZHANG, W. y GAO, Y. (2011). Topographic correction algorithm for remotely sensed data accounting for indirect irradiance. *Int. J. Remote Sens.*, 32, 7,1807–1824.
- ZHANG, X.D., LI, D.R., GONG, J.Y. y QIN, Q.Q. (2006). A Matching Method of Remote Sensing Image and GIS Data Based on Area Feature. *Journal of remote sensing*, 10, 3, 373-380.
- ZHANG, Z., DE WULF, R.R., VAN COILLIE, F.M.B., VERBEKE, L.P.C., DE CLERCQ, E.M. y OU, X. (2011). Influence of different topographic correction strategies on mountain vegetation classification accuracy in the Lancang Watershed, China, *Journal of Applied Remote Sensing*, 5, 053512.
- ZHOU, W. y TROY, A. (2008). An object-oriented approach for analysing and characterizing urban landscape at the parcel level. *Int. J. Remote Sens.*, 29, 11, 3119-3135.
- ZHU, Z. y EVANS, D.L. (1994). U.S. forest types and predicted percent forest cover from AVHRR data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 60, 525-531.
- ZHU, Z., WANG, S. y WOODCOCK, C.E. (2015). Improvement and expansion of the Fmask algorithm: cloud, cloud shadow and snow detection for Landsats 4-7, 8, and Sentinel 2 images. *Remote Sens. Environ.*, 159, 269-277.
- ZITOVÁ, B. y FLUSSER, J. (2003). Image registration methods: a survey. *Image and Vision Computing*, 21, 977-1000.



ANEXOS

ANEXO A. Parámetros del GeoEye-1 (Ampliación de los datos de la tabla 4.2)

Tabla A. Principales parámetros del GeoEye-1. Fuente: ESA (2018).

Dimensiones	4,35 m x 2,7 m
Estructura y Térmico	Un banco óptico y Sistema térmico pasivo de polarización en frío
Subsistema C & DH ¹	Placa posterior cPCI estándar / bus, CPU RAD750 Bus de datos MIL-STD-1553B
ADCS ²	1 Tbit de capacidad de almacenamiento a bordo (EOL) 3 ejes estabilizados, (8) RWA de alto rendimiento Estabilización ZMB (sesgo de impulso cero) Seguidor de estrellas de doble cabeza Giroscopios SIRU Sensor solar de 10 celdas Receptores GPS (2), Varillas de torsión EM (3) y un TAM Impulsión cardán biaxial para señalar la antena Precisión de apunte (3σ): 75 arcsec Conocimiento de señalamiento (3σ): 0.4 arcsec <i>Actitud jitter</i> : 0,007 arcsec/s rms (25 - 2000 Hz)
Propulsor a bordo	144,5 kg (adecuado para un suministro de 15 años)
Propulsores	8, cada uno de 22.2 N
Potencia	Conjunto solar desplegable de 7 paneles (GaAs), 3862 W EOL
Peso lanzamiento	Batería de 160 Ah de capacidad, NiH2 CPV 1.955 kg.

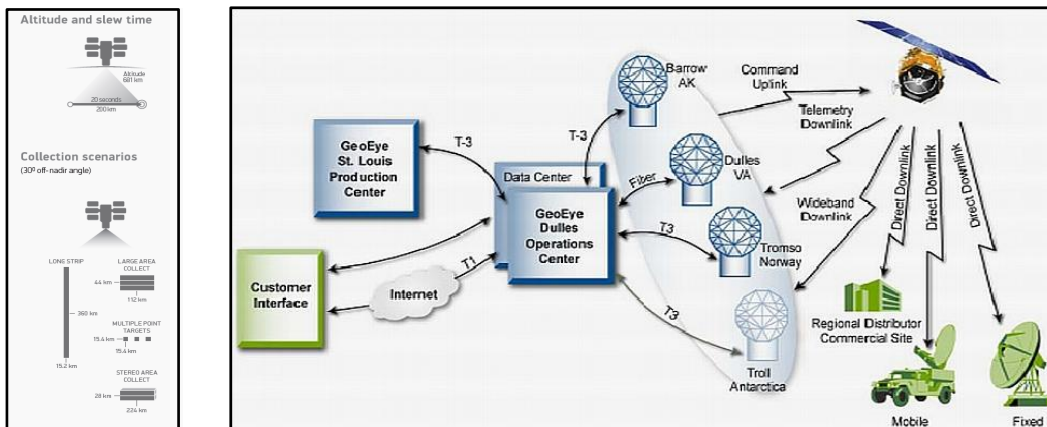


Figura A. Vista esquemática de los elementos del sistema de suelo GeoEye-1. Fuente: USGS (2007).

¹ Comando y manejo de datos

² Determinación de la altitud y subsistema de control

ANEXO B. Índices de vegetación

Tabla B. Índices de vegetación.

ÍNDICE DE VEGETACIÓN	FÓRMULA	REFERENCIA
RVI <i>Ratio Vegetation Index</i>	Q_{NIR}/Q_{red}	Birth y McVey (1968)
NDVI <i>Normalized Difference Vegetation Index</i>	$(Q_{NIR}-Q_{red})/(Q_{NIR}+Q_{red})$	Rouse <i>et al.</i> (1974)
TNDVI <i>Transformed Normalized Difference Vegetation Index</i>	$((Q_{NIR}-Q_{red})/(Q_{NIR}+Q_{red}))+0,5)^{0,5}$	Deering <i>et al.</i> (1975)
TVI <i>Transformed Vegetation Index</i>	$100((Q_{NIR}-Q_{red})/(Q_{NIR}+Q_{red}))+0,5)^{0,5}$	Deering <i>et al.</i> (1975)
IV <i>Simple Vegetation Index</i>	$Q_{NIR}-Q_{red}$	Richardson y Wiegand (1977)
PVI <i>Perpendicular Vegetation Index</i>	$(Q_{NIR}-aQ_{red}-b)/(a^2+1)^{0,5}$	Richardson y Wiegand (1977)
DVI <i>Difference Vegetation Index</i>	$Q_{NIR}-Q_{red}$	Tucker (1979)
IPVI <i>Infrared Percentage Vegetation Index</i>	$Q_{NIR}/(Q_{NIR}+Q_{red})$	Crippen (1980)
SAVI <i>Soil Adjusted Vegetation Index</i>	$(1+L)(Q_{NIR}-Q_{red})/(Q_{NIR}+Q_{red}+L)$	Huete(1988)
TSAVI <i>Transformed Soil Adjusted Vegetation Index</i>	$a(Q_{NIR}-aQ_{red}-b)/(aQ_{NIR}+Q_{red}-ab+X(1+a^2))$	Baret <i>et al.</i> (1989)
SAVI2 <i>Soil Adjusted Vegetation Index:2</i>	$Q_{NIR}/(Q_{red}+\theta)$	Major <i>et al.</i> (1990)
GEMI <i>Global Environmental Monitoring Index</i>	$(1-0,25\eta)-(Q_{red}-0,125)(1-Q_{red})$	Prinly y Verstraeye (1991)
ARVI <i>Atmospherically Resisten Vegetation Index</i>	$(Q_{NIR}-Q_{red}Q_{blue})/(Q_{NIR}+Q_{red}Q_{blue})$	Kaufman y Tanré (1992)
PRI <i>Photochemical Reflectance Index</i>	$(Q_{528}-Q_{567})/(Q_{528}+Q_{567})$ $(Q_{531}-Q_{570})/(Q_{531}+Q_{570})$ $(Q_{550}-Q_{531})/(Q_{550}+Q_{531})$ $(Q_{570}-Q_{539})/(Q_{570}+Q_{539})$	Gamon <i>et al.</i> (1992) Zarco-Tejada <i>et al.</i> (1999)
GVF <i>Green Vegetation Fraction</i>	$a_v/(a_v+a_s)$	Ustin <i>et al.</i> (1992)
MSAVI2 <i>Modified Soil Adjusted Vegetation Index 2</i>	$(2 \cdot Q_{IRC} + 1 - [(2 \cdot Q_{IRC} + 1)^2 - 8 \cdot (Q_{IRC} - Q_R)]^{0,5})/2$	Qi <i>et al.</i> (1994)
AVI <i>Angular Vegetation Index</i>	$\tan^{-1}\{((\lambda_3-\lambda_2)/\lambda_2)(Q_{NIR}-Q_{red})^{-1}\} + \tan^{-1}\{((\lambda_2-\lambda_1)/\lambda_2)(Q_{green}-Q_{red})^{-1}\}$	Plummer <i>et al.</i> , 1994
TWVI <i>Two-axis Adjusted Vegetation Index</i>	$(Q_{NIR}-Q_{red}-\Delta)/(Q_{NIR}-Q_{red}+L)(1+L)$	Xia (1994)
SARVI <i>Soil Adjusted Atmospheric Resistant Vegetation Index</i>	$(Q_{NIR}-Q_{red}Q_{blue})(1+L)/(Q_{NIR}+Q_{red}Q_{blue}+L)$	Kaufman y Tanré (1994)
NPCI <i>Normalized Pigment Chlorophyll Ratio Index</i>	$(Q_{680}-Q_{430})/(Q_{680}+Q_{430})$	Peñuelas <i>et al.</i> (1994)
SRPI <i>Simple Ratio Pigment Index</i>	Q_{430}/Q_{680}	Peñuelas <i>et al.</i> (1995)
RDVI <i>Renormalized Difference Vegetation Index</i>	$(DVI \cdot NDVI)^{1/2}$	Roujean y Breon (1995)

ÍNDICE DE VEGETACIÓN	FÓRMULA	REFERENCIA
MNDVI <i>Modified Normalized Difference Vegetation Index</i>	$MNDVI_{10}(1+C_2H_2)$	Liu y Huete (1995)
NDWI <i>Normalized Difference Water Index</i>	$(Q_{green}-Q_{NIR})/(Q_{green}+Q_{NIR})$	McFeeters, 1996
GNDVI <i>Green Normalized Difference Vegetation Index</i>	$(Q_{NIR}-Q_{green})/(Q_{NIR}+Q_{green})$	Gitelson <i>et al.</i> (1996)
OSAVI <i>Optimization Soil Adjusted Vegetation Index</i>	$(Q_{NIR}+Q_{red}+X)/(Q_{NIR}-Q_{red})$	Rondeaux <i>et al.</i> (1996)
MSR <i>Modified Simple Ratio</i>	$RDVI/Q_{red}^{0,5}$	Chen (1996)
PSSRa <i>Pigment-Specific Simple Ratio-cha</i>	Q_{800}/Q_{680}	Blackburn (1998)
PSNDa <i>Pigment Specific Normalized Difference-cha</i>	$(Q_{800}-Q_{680})/(Q_{800}+Q_{680})$	Blackburn (1998)
CAI <i>Cellulose Absorption Index</i>	$(Q_{2000}-Q_{2200})/Q_{2100}$	Daughtry <i>et al.</i> (2000)
AFVI <i>Aerosol-Free Vegetation Index</i>	$(Q_{NIR}-0,5Q_{2,1})/(Q_{NIR}+0,5Q_{2,1})$	Karnieli <i>et al.</i> (2001)
EVI <i>Enhanced Vegetation Index</i>	$2,5(Q_{NIR}-Q_{red})/(1+Q_{NIR}+6Q_{red}-7,5/Q_{blue})$	Huete <i>et al.</i> (2002)
WDRVI <i>Wide Dynamic Range Vegetation Index</i>	$(\alpha Q_{NIR}-Q_{red})/(\alpha Q_{NIR}+Q_{red})$	Gitelson (2004)
MTCI <i>MERIS Terrestrial Chlorophyll Index</i>	$(Q_{753,75}-Q_{708,75})/(Q_{708,75}-Q_{661,25})$	Curran y Dash (2005)
WBI <i>Water Band Index</i>	Q_{900}/Q_{970}	Van Gaalen <i>et al.</i> (2007)
LWI <i>Leaf Water Index</i>	Q_{1300}/Q_{1450}	Seeling <i>et al.</i> (2008)
LNDVI <i>Linearization of Normalized Difference Vegetation Index</i>	$1,2(Q_{IR}-Q_R)/(Q_{IRC}+5Q_R)$	Jiang <i>et al.</i> (2010)
TRVI <i>Total Ratio Vegetation Index</i>	$4(Q_{IR}-Q_R)/(Q_{IR}+Q_R+Q_G+Q_B)$	Fadaei <i>et al.</i> (2012)

ANEXO C. Definición del tipo de hábitat según el Manual de interpretación de los hábitats de la Unión Europea, versión EUR 28 (2013).

Código y nombre del tipo de hábitat en el Anexo 1 de la Directiva 92/43/CEE

9560 Bosques de altitud media dominados por *Juniperus* spp. arbóreos.

Endemic forests with *Juniperus* spp

Description:

Medium altitude forest formations dominated by *Juniperus* spp.

Subtypes:

Pal. 42.A2 Spanish juniper woods (*Juniperon thuriferae*): Forest formations dominated by *Juniperus thuriferae* of Spain (calcareous substrates in the supra-Mediterranean levels of the Iberian Range and neighbouring plateaux, often with *Pinus sylvestris*, *Pinus salzmannii*, *Juniperus hemisphaerica* and *Berberis hispanica*; enclaves on the periphery of and within the Sierra de Guadarrama, occurring both on rare local limestone deposits and in a few siliceous stations; dry, warm, rocky, calcareous southern slopes of the Cordillera Cantabrica, between the Rio Pisuegra and the Rio Luna, with *Juniperus nana*, *Juniperus sabina*, *Berberis vulgaris* subsp. *cantabrica*, *Rhamnus alpinus*, *Viburnum lantana*; gypsiferous soils of the Ebro basin, with *Rhamnus lycioides*; clay soils of the Campo de Montiel; Sierra Taibilla), southern France (Montagne de Rie); warm calcareous supra-Mediterranean slopes of the south-western Alps, in Drôme, Hautes-Alpes and Alpes-de-Haute-Provence, between 700 and 1200 metres; warm calcareous supra-Mediterranean slopes of the Isère valley, in the western Alps, between 300 and 500 metres; valleys in the interior of Corsica -Pinnera, Rudda, Prunicia-sometimes mixed with *Pinus laricio*.

Pal. 42.A3 Grecian juniper woods (*Juniperetum excelsae*): Forest formations dominated by *Juniperus excelsa*, of the *Ostryo-Carpinion* zone of the mountains of northern Greece (up to 900-1000m, around lake Prespa).

Pal. 42.A4 Stinking juniper woods: Forest formations dominated by *Juniperus foetidissima* on adrets of the upper supra-Mediterranean level in Greece.

Pal. 42.A5 Syrian juniper woods: *Juniperus drupacea* woods of the northern slopes of Mount Parnon, Greece.

Pal. 42.A8 Macaronesian juniper woods: *Juniperus cedrus* formations of the high altitudes in Tenerife, La Palma, Gomera, Gran Canaria, restricted to steep rocky slopes; *Juniperus phoenicea* formations of Tenerife, La Palma, Hierro, Gran Canaria, La Gomera (*Maytenio-Juniperion phoeniceae* p.); endemic *Juniperus brevifolia* formations of the Azores (*Juniperion brevifoliae* p.).

Fuente: Agencia Europea de Medio Ambiente (<https://eunis.eea.europa.eu/habitats/10237>).

ANEXO D. Distancia Tierra-Sol

Tabla C. Distancia Tierra-Sol en unidades astronómicas en función del día del año. Fuente: Chander *et al.*, 2009.

DOY	d	DOY	d	DOY	d	DOY	d	DOY	d	DOY	d
1	0,98331	61	0,99108	121	1,00756	181	1,01665	241	1,00992	301	0,99359
2	0,98330	62	0,99133	122	1,00781	182	1,01667	242	1,00969	302	0,99332
3	0,98330	63	0,99158	123	1,00806	183	1,01668	243	1,00946	303	0,99306
4	0,98330	64	0,99183	124	1,00831	184	1,01670	244	1,00922	304	0,99279
5	0,98330	65	0,99208	125	1,00856	185	1,01670	245	1,00898	305	0,99253
6	0,98332	66	0,99234	126	1,00880	186	1,01670	246	1,00874	306	0,99228
7	0,98333	67	0,99260	127	1,00904	187	1,01670	247	1,00850	307	0,99202
8	0,98335	68	0,99286	128	1,00928	188	1,01669	248	1,00825	308	0,99177
9	0,98338	69	0,99312	129	1,00952	189	1,01668	249	1,00800	309	0,99152
10	0,98341	70	0,99339	130	1,00975	190	1,01666	250	1,00775	310	0,99127
11	0,98345	71	0,99365	131	1,00998	191	1,01664	251	1,00750	311	0,99102
12	0,98349	72	0,99392	132	1,01020	192	1,01661	252	1,00724	312	0,99078
13	0,98354	73	0,99419	133	1,01043	193	1,01658	253	1,00698	313	0,99054
14	0,98359	74	0,99446	134	1,01065	194	1,01655	254	1,00672	314	0,99030
15	0,98365	75	0,99474	135	1,01087	195	1,01650	255	1,00646	315	0,99007
16	0,98371	76	0,99501	136	1,01108	196	1,01646	256	1,00620	316	0,98983
17	0,98378	77	0,99529	137	1,01129	197	1,01641	257	1,00593	317	0,98961
18	0,98385	78	0,99556	138	1,01150	198	1,01635	258	1,00566	318	0,98938
19	0,98393	79	0,99584	139	1,01170	199	1,01629	259	1,00539	319	0,98916
20	0,98401	80	0,99612	140	1,01191	200	1,01623	260	1,00512	320	0,98894
21	0,98410	81	0,99640	141	1,01210	201	1,01616	261	1,00485	321	0,98872
22	0,98419	82	0,99669	142	1,01230	202	1,01609	262	1,00457	322	0,98851
23	0,98428	83	0,99697	143	1,01249	203	1,01601	263	1,00430	323	0,98830
24	0,98439	84	0,99725	144	1,01267	204	1,01592	264	1,00402	324	0,98809
25	0,98449	85	0,99754	145	1,01286	205	1,01584	265	1,00374	325	0,98789
26	0,98460	86	0,99782	146	1,01304	206	1,01575	266	1,00346	326	0,98769
27	0,98472	87	0,99811	147	1,01321	207	1,01565	267	1,00318	327	0,98750
28	0,98484	88	0,99840	148	1,01338	208	1,01555	268	1,00290	328	0,98731
29	0,98496	89	0,99868	149	1,01355	209	1,01544	269	1,00262	329	0,98712
30	0,98509	90	0,99897	150	1,01371	210	1,01533	270	1,00234	330	0,98694
31	0,98523	91	0,99926	151	1,01387	211	1,01522	271	1,00205	331	0,98676
32	0,98536	92	0,99954	152	1,01403	212	1,01510	272	1,00177	332	0,98658
33	0,98551	93	0,99983	153	1,01418	213	1,01497	273	1,00148	333	0,98641
34	0,98565	94	1,00012	154	1,01433	214	1,01485	274	1,00119	334	0,98624
35	0,98580	95	1,00041	155	1,01447	215	1,01471	275	1,00091	335	0,98608
36	0,98596	96	1,00069	156	1,01461	216	1,01458	276	1,00062	336	0,98592
37	0,98612	97	1,00098	157	1,01475	217	1,01444	277	1,00033	337	0,98577
38	0,98628	98	1,00127	158	1,01488	218	1,01429	278	1,00005	338	0,98562
39	0,98645	99	1,00155	159	1,01500	219	1,01414	279	0,99976	339	0,98547
40	0,98662	100	1,00184	160	1,01513	220	1,01399	280	0,99947	340	0,98533
41	0,98680	101	1,00212	161	1,01524	221	1,01383	281	0,99918	341	0,98519
42	0,98698	102	1,00240	162	1,01536	222	1,01367	282	0,99890	342	0,98506

43	0,98717	103	1,00269	163	1,01547	223	1,01351	283	0,99861	343	0,98493
44	0,98735	104	1,00297	164	1,01557	224	1,01334	284	0,99832	344	0,98481
45	0,98755	105	1,00325	165	1,01567	225	1,01317	285	0,99804	345	0,98469
46	0,98774	106	1,00353	166	1,01577	226	1,01299	286	0,99775	346	0,98457
47	0,98794	107	1,00381	167	1,01586	227	1,01281	287	0,99747	347	0,98446
48	0,98814	108	1,00409	168	1,01595	228	1,01263	288	0,99718	348	0,98436
49	0,98835	109	1,00437	169	1,01603	229	1,01244	289	0,99690	349	0,98426
50	0,98856	110	1,00464	170	1,01610	230	1,01225	290	0,99662	350	0,98416
51	0,98877	111	1,00492	171	1,01618	231	1,01205	291	0,99634	351	0,98407
52	0,98899	112	1,00519	172	1,01625	232	1,01186	292	0,99605	352	0,98399
53	0,98921	113	1,00546	173	1,01631	233	1,01165	293	0,99577	353	0,98391
54	0,98944	114	1,00573	174	1,01637	234	1,01145	294	0,99550	354	0,98383
55	0,98966	115	1,00600	175	1,01642	235	1,01124	295	0,99522	355	0,98376
56	0,98989	116	1,00626	176	1,01647	236	1,01103	296	0,99494	356	0,98370
57	0,99012	117	1,00653	177	1,01652	237	1,01081	297	0,99467	357	0,98363
58	0,99036	118	1,00679	178	1,01656	238	1,01060	298	0,99440	358	0,98358
59	0,99060	119	1,00705	179	1,01659	239	1,01037	299	0,99412	359	0,98353
60	0,99084	120	1,00731	180	1,01662	240	1,01015	300	0,99385	360	0,98348
										361	0,98344
										362	0,98340
										363	0,98337
										364	0,98335
										365	0,98333
										366	0,98331

ANEXO E. Coordenadas de los puntos de control (GCP)

Tabla D. GCP para la imagen Norte y Sur.

GCP en el Norte		GCP en el Sur	
803531,754194	3073587,310404	799975,348529	3070518,549001
803386,537341	3073509,522748	800021,784766	3070564,944387
803323,037214	3073611,122951	800196,871255	3070251,154321
803212,070742	3073609,800032	799665,418353	3070316,799717
803285,241410	3073757,861162	799794,194570	3069813,967687
803374,141587	3073847,078840	799812,578728	3069495,171532
803482,779721	3074091,765996	798020,049491	3068836,599498
803571,751337	3074232,120680	798208,514508	3068781,116524
803645,617860	3074491,174739	798412,174734	3068528,173598
803789,181063	3074678,976365	798268,325490	3067802,624643
804283,630976	3075026,505504	799779,071767	3068870,790476
804349,975379	3075086,764479	799749,210025	3068745,009506
804197,839658	3075088,748858	798533,911650	3066683,914953
804254,438556	3075151,186240	798627,957422	3066453,047699
804048,360800	3075288,518494	797042,987250	3067396,098804
803953,904362	3075392,182451	796786,687018	3067725,602870
803968,588766	3075485,051387	796625,159419	3067693,239295
803967,795014	3075586,535835	796538,524154	3063743,762809
804582,952495	3076327,886588	797311,711589	3064184,236937
804701,803566	3076529,287824	796945,749941	3064058,127132
804845,174946	3076638,422053	797946,164081	3061732,340157
804896,768799	3076882,765250	797669,422628	3061312,627654
804806,479556	3077014,660305	797788,144158	3061339,363356
804887,177634	3077011,022277	798089,060689	3061047,977186
805289,135643	3076719,638274	797532,656027	3061014,988059
805311,625271	3077300,399853	798002,477083	3061024,334132
806774,829153	3078979,041144	798016,563414	3060980,216177
806558,531845	3079116,624752	795735,930397	3062419,434649
806320,970814	3081104,028797	794398,757203	3063068,337389
806354,982188	3080866,898156	794487,381796	3063330,938466
805854,372984	3081755,006963	794178,179594	3063617,292040
805590,212455	3081831,498158	795525,269085	3065460,985192
803884,949618	3080295,132429	795723,975590	3065529,991236
803982,104812	3080566,833597	795908,915809	3065618,053689
803949,164121	3080811,705962	794400,072513	3065900,270679
803632,346994	3078368,499990	793808,171014	3066185,853213
803300,651435	3082401,657640	793725,010272	3066256,255812
803087,926010	3082867,325238	793436,957434	3065377,582972
801687,924599	3081248,773147	793604,865758	3065392,243642
801323,208973	3081229,154253	793457,721738	3065184,638198
800594,947184	3081071,578688	793435,999233	3065093,190257

800392,692664	3080564,540758	785195,915901	3069901,062394
798083,787257	3079872,929248	783066,716955	3069639,944580
798740,875106	3080039,120546	781333,957239	3070218,677682
798175,459391	3080114,826808	781254,938387	3067962,443645
794633,836822	3075529,191595	781362,359435	3067901,060189
793788,226797	3075214,865966	781497,910157	3067789,158854
792724,670226	3074364,440516	781653,472239	3068192,305285
794497,443841	3073634,127319	783776,737451	3068847,529141
794224,701976	3073449,602123	784795,484541	3069039,435124
802342,410920	3077501,891592	784607,299268	3068865,762276
802448,963251	3077674,969125	784769,224592	3068796,970472
802478,596644	3077775,405160	786697,436149	3069507,872033
802339,388490	3077811,097523	787140,596479	3070372,179317
802619,543113	3077896,888840	786595,090701	3068583,261677
800206,736725	3075881,553559	786342,413112	3068658,668078
800263,886839	3075737,090770	785205,672644	3068620,127028
800392,593659	3075667,646326	785021,786860	3068710,019396
800561,620635	3075474,405407	783119,899407	3068757,368883
800883,213500	3075248,867508	782755,642393	3071139,241007
801960,892235	3076352,479872	784642,354639	3071233,110952
798563,277370	3077646,788849	784785,759093	3071237,344294
798579,755433	3077962,487007	784729,667314	3071430,913848
800004,446046	3078813,834091	787140,804065	3068138,562121
799811,136667	3078821,359849	787163,955153	3068375,364677
799753,086967	3078937,336657	787452,351563	3068173,619482
798367,396721	3073124,523601	787497,992279	3068387,270951
798470,888699	3074662,433839	786065,270664	3068256,257842
799367,067314	3074990,504599	788037,072198	3067781,340392
799530,602189	3075078,357466	788241,860107	3067770,757038
801079,266658	3073467,969991	788615,046526	3069261,223063
801124,925013	3073592,439060	788346,238893	3069108,896114
801136,294843	3073331,204388	788347,152978	3069303,295638
801175,417977	3073265,552312	788061,603874	3068456,923975
801171,101733	3073113,617675	788270,640432	3068489,493928
800938,174006	3072815,164432	787841,187216	3068688,549826
800444,865332	3072894,830854	787137,885812	3069048,883193
800551,050333	3073091,087698	786607,920001	3069137,922463
792251,347816	3074110,234746	789668,205042	3070514,321157
792031,198609	3074144,927203	789791,135858	3070002,940276
792307,223518	3073925,276295	791665,113071	3069203,720436
792269,817975	3073470,170003	791482,896838	3069366,185820
791970,539230	3073478,589061	791818,486032	3071431,741186
792163,288574	3073372,041140	791734,685144	3070618,215136
791858,576159	3073306,688926	789683,093298	3068226,248937
791470,025497	3073746,870042	789608,587653	3068215,131269
793827,820490	3071955,262466	789430,189194	3068299,099060
793630,970096	3072116,552789	788786,098848	3068161,131970
793704,339201	3071976,693759	789067,972207	3068798,416435

793933,795146	3072097,449834	789051,718911	3068681,244212
794076,632949	3072105,740128	788809,755463	3068821,188466
787502,741265	3072776,111972	789216,777462	3067269,013888
787439,241138	3072933,433537	789157,003400	3067491,496068
787367,803495	3072820,720811	789380,277962	3067563,222918
787509,100097	3072999,112071	789436,616361	3067363,657346
787314,966097	3073071,036548	790451,584340	3069055,374936
787565,943735	3073124,182627	790111,842542	3069109,969591
787180,462686	3073141,724537	790941,480989	3067957,260261
786947,946388	3073253,608233	790927,886220	3067926,855730
786915,171062	3072948,087073	791134,725166	3067938,880847
787128,822531	3072881,253189	791260,642443	3067940,863454
787232,883364	3072810,963840	790385,318537	3067498,282421
787930,675676	3072593,990080	790070,925692	3067563,773967
785268,169070	3073530,684636	790099,766570	3067675,282639
785302,564972	3073368,759312	791631,087315	3067593,786384
785044,489872	3073437,418824	791758,920732	3067486,313472
784832,944932	3073570,938425	791873,056289	3067709,013518
784234,255151	3073864,735874	791138,147333	3067345,372835
783893,691623	3073165,473798	791292,340831	3067400,557950
782236,635965	3074334,184816	792024,184455	3067313,074797
780826,159238	3073441,660104	791764,802835	3066205,295834
780953,159492	3073317,041105	791186,231705	3066474,117702
780832,751785	3073061,458606	791117,503427	3066658,671006
780925,253611	3072951,073557	791923,478438	3066505,271777
780604,292219	3072694,003876	792916,509436	3066661,766823
780636,310174	3072596,210373	792731,980557	3066625,264558
780801,657449	3072944,746695	793321,761195	3066204,395484
781539,792105	3072077,321531	793303,158647	3067932,239731
785459,041993	3071437,579800	793103,154503	3067861,952877
785704,337692	3071753,810432	792535,222961	3067837,051933
786853,135684	3071124,134246	792575,120413	3067618,453104
787944,991704	3070855,974092	792577,884863	3068590,430670
784092,121498	3071188,291423	792453,376005	3068397,523684
782639,500972	3071330,284763	793443,240830	3068405,159976
782275,433577	3072782,188708	793093,116057	3068719,377191
781687,831403	3071297,884264	792328,066600	3068739,745092
781220,937900	3071463,447616	791513,229599	3068351,172660
781503,584021	3070765,113789	791762,504170	3068372,486254
781802,272743	3070954,741043	792042,714357	3068694,529716
781995,948130	3071004,747393	793519,437018	3070780,431195
790293,115495	3073156,237529	793614,002700	3070560,593480
790969,907786	3072926,949154	794985,183242	3070742,613134
791790,297677	3071402,931995	795314,080536	3070784,644830
789854,915230	3070743,112759	795211,661780	3070962,544464
797029,416225	3072067,945753	797049,007233	3071214,240840
798548,899299	3070987,076578	796926,379821	3071051,814808
798776,688366	3071173,859555	799205,303085	3067348,732565

798538,527612	3071883,976184	802501,756184	3071753,070032
796920,711504	3070931,072112	802849,150200	3071868,071671
800881,061171	3072074,577411	802445,898895	3071957,813877
800767,488548	3072022,917412	802817,278725	3071914,734947
802730,694193	3072329,085038	802651,054794	3071954,329575
802502,675820	3071751,657216	802639,984070	3071822,336868
800299,287359	3082629,108587	802738,317200	3071523,993027
799387,743036	3082763,252605	802788,330429	3071358,575241
799831,789722	3083142,507996	802214,498703	3071983,126186
800083,144392	3083128,220467	802192,230789	3071906,356678
802876,268034	3084004,469303	802427,743057	3071507,286568
795477,575430	3076580,361126	802006,251022	3070943,475216
795872,202261	3077159,270618	802441,614075	3071012,123199
796294,879391	3077539,246117	796006,219933	3068997,420639
798071,555939	3076240,428640	795896,278221	3069006,726875
798138,844466	3076173,295336	780200,967445	3069820,558426
784018,018364	3070717,187670	781691,914619	3071305,555058
783742,551161	3071151,962881	781345,515709	3071182,668037
783893,007944	3073162,894794	781221,798721	3071465,955513
785953,034956	3072641,833627	781125,719788	3071104,305901
781730,580381	3071588,715814	780514,775253	3069490,170650
781693,087427	3071303,209826	781810,074875	3070963,883816
786155,690842	3072642,985979	781867,516220	3071006,069244
785991,065050	3072819,943246	782379,235733	3070088,254913
786055,758018	3072458,602572	781946,702057	3069717,663834
785304,923185	3073451,121276	781868,392670	3069882,207542
785456,044760	3073419,511227	782142,144409	3069754,178020
784997,849005	3073459,095833	781210,224548	3069019,897049
792250,585945	3074110,212978		
792347,384985	3073683,034881		
792133,199257	3073091,565138		
794767,423183	3076750,760757		
794840,736546	3076315,957204		
803218,610447	3078318,502694		
803150,371719	3078019,848953		
801710,196846	3077045,641541		
801551,569740	3077177,195554		
802376,274532	3077741,289685		
802374,698856	3077631,819765		
802542,323048	3077768,150702		
801945,697180	3076325,862822		
801438,217690	3076127,088774		
793704,261071	3071976,673540		
793501,489667	3072022,552615		
793413,259140	3072055,945558		
793277,251133	3071829,018854		
793536,890414	3071789,132524		
793856,020231	3071938,079353		

788086,399544	3072302,948395		
788359,899627	3072331,241007		
790347,675139	3073165,558282		
790967,347223	3072927,778942		
793911,051334	3074568,234513		
800597,756327	3081030,885634		
800866,023958	3081102,463181		
801717,638963	3081253,099636		
801725,735801	3080717,379170		
799420,629607	3080375,066232		
806355,264872	3079091,074903		
806474,013474	3079255,775587		
806720,800189	3078997,188654		
806610,206748	3079135,722785		
806227,044587	3079430,529959		
801396,722664	3075962,167482		
798117,644276	3079980,357731		
799905,399418	3078819,348846		
799820,980728	3078659,022509		
799649,556545	3079353,628391		

ANEXO F. Listado de abreviaturas y acrónimos.

6S	<i>(Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum)</i>
AC	<i>(Atmospheric Calibration)</i>
ACORN	<i>(Atmospheric Correction Now)</i>
AEMET	<i>(Agencia Estatal de Meteorología)</i>
ATCOR	<i>(Atmospheric Correction)</i>
BOA	<i>(Bottom Of Atmosphere)</i>
BRDF	<i>(Bidirectional Reflectance Distribution Function)</i>
BTN25	<i>(Base Topográfica Nacional 1:25.000)</i>
CC	<i>(Corrección C)</i>
CEE	<i>(Comunidad Económica Europea)</i>
COST	<i>(Cosine Estimation of Atmospheric Transmittance)</i>
DDV	<i>(Dense Dark Vegetation)</i>
DOS	<i>(Dark-Object Subtraction)</i>
DVI	<i>(Difference Vegetation Index)</i>
E	<i>(Este)</i>
EA	<i>(Error de Ajuste)</i>
EC	<i>(Error de Corrección)</i>
EE	<i>(Empírico-Estadístico)</i>
EROS	<i>(Earth Resources Observation Satellite)</i>
ERS-1	<i>(European Remote Sensing-1)</i>
ESA	<i>(European Space Agency)</i>
ESRI	<i>(Environmental Systems Research Institute)</i>
FLAASH	<i>(Fast Line-of-Sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes)</i>
GCA	<i>(Ground Control Areas)</i>
GCP	<i>(Group of Control Points)</i>
GDOS	<i>(Ground-based Dark-Object Subtraction)</i>
GNDVI	<i>(Green Normalized Difference Vegetation Index)</i>
GPS	<i>(Global Positioning System)</i>
GRAFCAN	<i>(Cartográfica de Canarias)</i>
GSD	<i>(Ground Sample Distance)</i>
ID	<i>(Índice de Dispersión)</i>
IRC	<i>(Infrarrojo cercano)</i>
IRM	<i>(Infrarrojo medio)</i>
IV	<i>(Índice de vegetación)</i>
LAI	<i>(Leaf Area Index)</i>
LIDAR	<i>(Light Detection and Ranging)</i>
LNDVI	<i>(Linearization of Normalized Difference Vegetation Index)</i>
LOWTRAN	<i>(Low Resolution Atmospheric Transmission)</i>
Ma	<i>(Millón de años)</i>
MAD	<i>(Multivariate Alteration Detection)</i>
MDDV	<i>(Modified Dense Dark Vegetation)</i>
MDE	<i>(Modelo Digital de Elevaciones)</i>
MLP	<i>(Multi Layer Perception)</i>
MODIS	<i>(Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer)</i>
MORTRAN	<i>(Moderate Resolution Atmospheric Transmission)</i>
MOS-1	<i>(Marine Observation Satellite-1)</i>

MS	<i>(Multispectral)</i>
MSAVI	<i>(Modified Soil Adjusted Vegetation Index)</i>
MSR	<i>(Modified Simple Ratio)</i>
N	<i>(Norte)</i>
ND	<i>(Nivel Digital)</i>
NDVI	<i>(Normalized Difference Vegetation Index)</i>
NE	<i>(Noise Equivalent) (Noreste)</i>
NITF	<i>(National Image Transmission File)</i>
NO	<i>(Noroeste)</i>
NOAA	<i>(National Oceanic and Atmospheric Administration Satellite)</i>
OSAVI	<i>(Optimization Soil Adjusted Vegetation Index)</i>
PARA	<i>(Path Radiance)</i>
PBC	<i>(Pixel-based Correction C)</i>
PBM	<i>(Pixel-based Minnaert)</i>
PHEH	<i>(Pla Hidrológico de El Hierro)</i>
PIF	<i>(Pseudoinvariants Features)</i>
PNOA	<i>(Plan Nacional de Ortofotografía Aérea)</i>
PVI	<i>(Perpendicular Vegetation Index)</i>
PSSSR	<i>(Processing Scheme for Standardised Surface Reflectance)</i>
QUAC	<i>(Quick Atmospheric Correction)</i>
RDMR	<i>(Relative Difference of Mean Radiance)</i>
RDVI	<i>(Renormalized Difference Vegetation Index)</i>
REGCAN95	<i>(Red Geodésica de Canarias de 1995)</i>
RER	<i>(Range Error Ratio)</i>
RFM	<i>(Rational Function Model)</i>
RMS	<i>(Root Mean Square)</i>
RMSE	<i>(Root Mean Square Error)</i>
RTCs	<i>(Radiative Transfer Codes)</i>
RVI	<i>(Ratio Vegetation Index)</i>
S	<i>(Sur)</i>
SAVI	<i>(Soil Adjusted Vegetation Index)</i>
SCS	<i>(Sun Canopy Sensor)</i>
SD	<i>(Standard Desviation)</i>
SE	<i>(Sureste)</i>
SIG	<i>(Sistemas de Información Geográfico)</i>
SMAC	<i>(Simplified Method for Atmospheric Correction)</i>
SO	<i>(Suroeste)</i>
SPOT	<i>(Satellite Pour l'Observation de la Terre)</i>
SR	<i>(Simple Ratio)</i>
TDI	<i>(Time Delay and Integration)</i>
TF	<i>(Transmittance Functions)</i>
TOA	<i>(Top Of Atmosphere)</i>
TRVI	<i>(Total Ratio Vegetation Index)</i>
UNESCO	<i>(United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization)</i>
USGS	<i>(United States Geological Survey)</i>
UTC	<i>(Universal Time Coordinated)</i>
UTM	<i>(Universal Transverse Mercator)</i>
UV	<i>(Ultravioleta)</i>
WDRVI	<i>(Wide Dynamic Range Vegetation Index)</i>

Citar como:

CAMPO MORENO, S. (2018). Cartografía de los sabinares de *Juniperus turbinata* Guss. en la reserva de la biosfera de El Hierro (Islas Canarias) mediante teledetección. Tesis Doctoral. Departamento de Geografía, Universitat de Barcelona, 250 pp.