UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
DE MINAS Y ENERGÍA**

POLITÉCNICA

**Integración de técnicas de teledetección y
estadísticas para la localización de fugas
de dióxido de carbono en zonas de
almacenamiento geológico a través del
estudio de análogos naturales**

TESIS DOCTORAL

Miguel Angel Rincones Salinas

Ingeniero del Ambiente y de los Recursos Naturales

*Máster en Investigación, Modelización y Análisis del Riesgo en el
Medio Ambiente*

Madrid, 2017

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA GEOLÓGICA Y MINERA
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE MINAS Y ENERGÍA

Integración de técnicas de teledetección y estadísticas para la localización de fugas de dióxido de carbono en zonas de almacenamiento geológico a través del estudio de análogos naturales

Autor:

Miguel Angel Rincones Salinas

Ingeniero del Ambiente y de los Recursos Naturales

Máster en Investigación, Modelización y Análisis del Riesgo en el Medio Ambiente

Director:

Luis Iglesias Martínez

Doctor Ingeniero Agrónomo

Madrid, 2017

POLITÉCNICA

Tribunal nombrado por el Magfco. y Excmo. Sr. Rector de la Universidad Politécnica de Madrid, el día ____ de _____ de 2017.

Presidente: _____

Vocal: _____

Vocal: _____

Vocal: _____

Secretario: _____

Suplente: _____

Suplente: _____

Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis el día ____ de _____ de 2017 en la *E.T.S. de Ingenieros de ...* de la *U.P.M.*

Acuerda otorgarle la calificación de:

Madrid, a ____ de _____ de 2017.

EL PRESIDENTE

LOS VOCALES

EL SECRETARIO

A quienes han creído en mí y me han apoyado en todo momento durante esta etapa de mi vida.

Agradecimientos

Me gustaría manifestar mi más profundo agradecimiento a todas aquellas personas e instituciones que me apoyaron en el desarrollo de esta tesis.

En primer lugar, a Luis Iglesias Martínez, director de la tesis doctoral, porque desde el inicio de mi formación académica de doctorado me ha respaldado y apoyado. Su interés, voluntad y ejemplo me han servido inspiración para llevar a cabo esta investigación, además que sus consejos, guías y paciencia me han servido para lograr todos los objetivos propuestos.

Al grupo de trabajo y equipo de investigación, conformado por Rogelio de la Vega Panizo, Jorge Gutiérrez del Olmo Miguel y Rafael García Rodríguez, que durante mucho tiempo hemos compartido y colaborado entre nosotros para el beneficio de las investigaciones realizadas. Igualmente a la empresa AMPHOS 21 por financiar la adquisición de las imágenes hiperespectrales para el estudio. Además de la valiosa colaboración y ayuda de Héctor Mateos Martín y Jairo Escobar Villanueva.

A los profesores del Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de la Universidad Politécnica de Madrid que me han transmitido sus conocimientos, experiencias y me ayudaron durante mi formación académica. En especial al profesor Luis Felipe Mazadiego Martínez, que desde el inicio de esta investigación impulsó y apoyó las labores de la investigación.

A los miembros del tribunal de prelectura de la tesis agradezco enormemente todas las sugerencias y recomendaciones realizadas, bajo su punto de vista y experticia, que ayudaron en la elaboración de esta investigación.

Al Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial por sus aportes técnicos y conocimientos, así como el trabajo profesional que realizaron para aportar parte de los datos de esta investigación.

Al Ministerio de Educación, Cultura y Deporte del Gobierno de España agradezco el apoyo recibido mediante el programa de Formación del Profesorado Universitario, ya que en su convocatoria del año 2012, recibí el apoyo de dicho programa para la ejecución de esta tesis doctoral.

A mi familia les debo todos los momentos de comprensión y apoyo que me dieron durante todo este tiempo, que en las buenas y no tan buenas, han estado a mi lado ofreciéndome esas palabras de aliento tan necesarias.

Y a todas aquellas personas, que no menciono personalmente, pero que de alguna manera u otra han aportado su granito de arena.

Tabla de contenidos

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	1
1.1 Objetivos.....	3
1.2 Plan de trabajo.....	4
CAPÍTULO 2. CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE DIÓXIDO DE CARBONO (CAC)	10
2.1 Experiencias de proyectos de captura y almacenamiento de CO ₂	17
2.2 Técnicas de monitorización de fugas en emplazamientos de almacenamiento geológico de dióxido de carbono.	20
CAPÍTULO 3. FUNDAMENTOS DE LA TELEDETECCIÓN PARA LA IDENTIFICACIÓN DE EMISIONES DE CO ₂	26
3.1 Características de los sensores remotos.	27
3.2 Imágenes hiperespectrales.....	31
3.3 Firmas espectrales	31
3.4 Distorsiones radiométricas y la corrección radiométrica.....	33
3.4.1 Efectos geométricos y la corrección geométrica	34
3.4.2 Efectos atmosféricos y la corrección atmosférica	35
3.4.3 Efectos topográficos y la corrección topográfica	37
3.5 Teledetección aplicada al estudio de fugas de CO ₂	38
CAPÍTULO 4. ZONA DE ESTUDIO “CAMPO DE CALATRAVA”	44
4.1 Ubicación	44
4.2 Características abióticas.	46
4.2.1 Geología y Relieve	46
4.2.2 Climatología.....	50
4.3 Características bióticas	52
4.3.1 Biogeografía y vegetación	52
4.3.2 Fauna	55
4.4 Demografía y usos del suelo.....	56
CAPÍTULO 5. MATERIALES Y MEDIOS.	58
5.1 Imágenes hiperespectrales.....	58
5.1.1 Imágenes hiperespectrales del sensor Airborne Hyperspectral Scanner (AHS).	61

5.1.2 Imágenes hiperespectrales del sensor Compact Airborne Spectrographic Imager (CASI) 1500i	62
5.1.3 Correcciones radiométricas realizadas por el suministrador.	64
5.1.3.1 Imágenes del sensor AHS	64
5.1.3.2 Imágenes del sensor CASI 1500i.....	65
5.2 Firmas Espectrales de Referencia (FER) adquiridas en campo con el espectrorradiómetro	67
5.3 Productos cartográficos complementarios	69
5.3.1 Ortofotos y Modelos Digitales de Terreno (MDT)	70
5.3.2 Cartografía Geológica.....	71
5.4 Mediciones de Flujo de CO ₂ en análogos naturales.....	71
5.4.1 Análogos naturales “Hervideros” Húmedos.	73
5.4.2 Análogos naturales secos.....	73
CAPÍTULO 6. METODOLOGÍA.....	75
6.1 Pre-tratamiento de las imágenes hiperespectrales.	75
6.1.1 Georreferenciación espacial	76
6.1.2 Corrección Atmosférica.....	77
6.1.2.1 Método QUick Atmospheric Correction (QUAC).....	77
6.1.2.2 Método Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes (FLAASH™)	79
6.1.3 Corrección Topográfica	80
6.1.4 Verificación de las correcciones radiométricas.	82
6.2 Análisis de las imágenes hiperespectrales.	83
6.2.1 Definición de los elementos a detectar.	84
6.2.2 Selección de las imágenes según sus características espaciales y espectrales.	85
6.2.3 Elección de la técnica de procesamiento.....	86
6.2.4 Uso de datos e información auxiliar de apoyo a las imágenes.	87
6.2.5 Producto de salida.....	87
6.3 Propuesta A: Análisis de todas las bandas espectrales y aplicación de las correlaciones cruzadas.	88
6.4 Propuesta B: Selección de bandas por Análisis de Componentes Principales y elaboración de ratios entre Bandas.	91
CAPÍTULO 7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.	95
7.1 Correcciones radiométricas de las imágenes AHS Y CASI 1500	96

7.1.1 Corrección geométrica	96
7.1.2 Corrección atmosférica	98
7.1.3 Corrección topográfica	100
7.1.4 Verificación de las imágenes corregidas según indicadores estadísticos calculados a partir de las firmas espectrales de referencia	101
7.1.4.1 Clasificación de las firmas espectrales de referencia	105
7.1.4.1.1 Vegetación dispersa alta	106
7.1.4.1.2 Coberturas homogéneas	108
7.1.4.1.3 Cultivos leñosos de cobertura heterogénea	110
7.1.4.1.4 Análogos naturales secos	111
7.1.4.1.5 Análogos naturales húmedos	114
7.1.5 Consideraciones sobre verificación de las imágenes corregidas	116
7.2 Propuesta A: Análisis de todas las bandas espectrales y aplicación del método de las correlaciones cruzadas	119
7.2.1 Selección de las firmas espectrales de referencia (FER)	119
7.2.2 Cálculo de las correlaciones cruzadas	121
7.2.3 Reclasificación de las imágenes	123
7.2.3.1 Firmas espectrales de referencia asociadas a los análogos naturales húmedos	123
7.2.3.2 Firmas espectrales de referencia asociadas a los análogos naturales secos	125
7.2.3.3 Firmas espectrales de referencia asociadas a otras coberturas terrestres.	126
7.2.3 Observaciones a la aplicación del método de las correlaciones cruzadas.	127
7.3 Propuesta B: Selección de bandas por Análisis de Componentes Principales (ACP) y elaboración de ratios entre bandas espectrales.	128
7.3.1 Análisis de Componentes Principales (ACP)	128
7.3.1.1 Determinación de la zona del espectro electromagnética con mayor varianza en los datos	131
7.3.2 Construcción de los ratios entre bandas	136
7.3.2.1 Significado de los ratios espectrales.	139
7.3.2.2 Los análogos naturales representados por los ratios	142
7.3.3 Identificación de indicios de emisiones a través de la reclasificación de imágenes.	143
7.3.3.1 Determinación de los puntos con emisiones de CO ₂	146

7.3.3.2 Validación de la presencia de emisiones de CO ₂	146
7.3.3.2.1 Apoyo de la información geológica y cartográfica	149
7.3.3.2.2 Mediciones realizadas en “Arroyo Palomarejo”	150
7.3.3.2.3 Mediciones realizadas en hervidero húmedo de la zona A.	152
7.3.3.2.3 Mediciones realizadas en hervidero húmedo de la zona B.....	153
7.3.3.3 Consideraciones a la selección de bandas y elaboración de ratios entre bandas espectrales	154
CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES	156
8.1 Conclusiones	156
8.2 Recomendaciones y futuras líneas de investigación	160
8.2.1 Elaboración de Estudios de Línea Base previos a la inyección de CO ₂	160
8.2.2 Adición de segundo nivel de adquisición de datos remotos	161
8.2.3 Definición de una resolución temporal adecuada durante la monitorización.	161
8.2.4 Interpretación de los datos adquiridos de la vegetación.	162
8.2.5 Ampliación de la información complementaria.....	163
9. Referencias bibliográficas	170
ANEXOS.....	176
Anexo 1. Listado de las imágenes hiperespectrales adquiridas por el INTA y procedimientos de tratamiento.	176
Anexo 2. Firmas espectrales de referencia medidas en campo con el espectrorradiómetro FieldSpec 3.	187
Anexo 3. Ortofotografía del Campo de Calatrava. Fuente: Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA).	188
Anexo 4. Modelo digital del terreno (MDT) de Campo de Calatrava. Fuente: Instituto Geográfico Nacional (IGN)	189
Anexo 5. Datos y mapas geológicos de Campo de Calatrava. Fuente: Instituto Geológico y Minero de España (IGME).....	190
Anexo 6. Mediciones de flujo de CO ₂ en Campo de Calatrava. Fuente: Elío, J., 2015.	192
Anexo 7. Características y especificaciones técnicas del detector de CO ₂ Telair. ...	192
Anexo 8. Imágenes en reflectancia con las correcciones radiométricas de las imágenes P01BD a P08BD del sensor AHS.	194
Anexo 9. Imágenes en composición en falso color de los ratios entre bandas calculados en la propuesta B.....	195
Anexo 10. Imágenes AHS en falso color de NDVI	196

Anexo 11. Imágenes AHS reclasificadas indicando zonas de emisiones de CO ₂ identificadas por la propuesta B.....	197
Anexo 12. Imagen de alta resolución del “Arroyo Palomarejo” y especificaciones técnicas del dron Phantom 3.....	202

Listado de figuras

Figura 1. Emisiones de GEI mundiales. a) Emisiones anuales mundiales de GEI antropogénicos entre 1970 y 2004 b) Parte proporcional que representan diferentes GEI antropogénicos respecto de las emisiones totales en 2004, en términos de CO ₂ equivalente. c) Parte proporcional que representan diferentes sectores en las emisiones totales de GEI antropogénicos en 2004, en términos de CO ₂ equivalente. (En el sector silvicultura se incluye la deforestación). Tomado de IPPC (IPCC, 2007)	10
Figura 2. Tecnologías de separación de CO ₂ en la postcombustión, basado en RAO A.B., 2002. Fuente: Wang,M et al. 2011.	14
Figura 3. Proyectos CAC a gran escala clasificados según la etapa de desarrollo y a región/país en febrero de 2014. Fuente: (EIAGHG, 2014)	18
Figura 4. Planta de captura de CO ₂ del proyecto OXYCFB300 Compostilla. (ENDESA; CIUDEN; Foster Wheeler, 2013)	20
Figura 5. Esquema de técnicas de monitorización de CO ₂ . Fuente: British Geologic Survey. (IPCC, 2005).....	22
Figura 6. Diagrama de las regiones del espectro electromagnético.	30
Figura 7. Firmas espectrales obtenidas con espectroradiómetro de campo (resolución espectral =1nm).....	32
Figura 8. Diagrama de ejemplo sobre la resolución espectral respecto a Landsat 7 ETM+.	33
Figura 9. (izq.) Cálculo en MODTRAN de la reflectancia aparente de un píxel de vegetación observado desde el espacio con una vista nadir, bajo un modelo atmosférico de verano en latitud media y aerosoles rurales con una visibilidad =23km (Bernstein, L., et al., 2005). (der.) Contribuciones de la transferencia de radiación a la reflectancia aparente observada en el sensor, p_{obs}	36
Figura 10. CO ₂ atmosférico medido por SCIAMACHY sobre el hemisferio en el año 2003. Los valores bajos (azul) en julio/agosto, respecto a valores más altos (verde y amarillo), se deben a la fijación de CO ₂ por la vegetación (bosques boreales), que están en su fase de crecimiento durante los meses de verano. Fuente: M. Buchwitz, 2005.....	39
Figura 11. Ubicación del Campo de Calatrava en el territorio peninsular de España. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Instituto Geográfico Nacional.	45
Figura 12. Líneas estructurales del campo de Calatrava. Fuente: Vera, J. A., 2004.....	46
Figura 13. Afloramientos volcánicos en la región de Calatrava. Fuente: Vera, J. A., 2004.	47
Figura 14. Mosaico de fotografías aéreas del Campo de Calatrava señalando los puntos de emisiones de CO ₂ conocidos. Fuente: Instituto Geográfico Nacional.....	49
Figura 15: Especies vegetales características del Campo de Calatrava.....	52

Figura 16. Mapa biogeográfico de la península Ibérica. Fuente: Rivas-Martínez, S. (2001).	53
Figura 17. Formaciones de encinares en el paisaje del Campo de Calatrava.	54
Figura 18. Vegetación acuática y de ribera de los géneros Scirpus y Juncus.	54
Figura 19. Plataforma de vuelo CASA 212-200 “Paternina”	59
Figura 20. Diagrama del plan de vuelo a 3673 m y 3734 m (a), y 1646 m (b) de altitud sobre el nivel normal respectivamente.	60
Figura 21. Sensor Airborne Hyperspectral Scanner (AHS).	61
Figura 22. Sensor Compact Airborne Spectrographic Imager (CASI) 1500i	62
Figura 23. Relación señal a ruido de los ficheros obtenidos por el sensor AHS.	64
Figura 24. Relación señal a ruido de los ficheros obtenidos por el sensor CASI 1500i. .	66
Figura 25. Comparación entre: (a) corrección geométrica de las pasadas P02 y P12 del sensor CASI 1500i (der.) y AHS (izq.); (b) corrección radiométrica de la pasada P02 sobre suelo desnudo de los dos sensores.	66
Figura 26. Ubicación de las firmas espectrales de referencia. En las elipses se señalan áreas de análogos naturales.	69
Figura 27. Distribución de hojas de la zona de estudio en el Campo de Calatrava. Fuente: Instituto Geográfico Nacional.	70
Figura 28. Puntos de medición de gases por Elío, J. (2015) en las zonas Baño Chico (izq.) y Barranco Pequeño (der.)	73
Figura 29. Puntos de medición de gases por Elío, J. (2012) en La Sima.	74
Figura 30. Esquema del pre procesamiento de imágenes.	76
Figura 31. Diagrama de flujo del algoritmo “Topographic Normalize” del programa ERDAS.	81
Figura 32. Árbol de decisión para analizar imágenes hiperespectrales.	84
Figura 33. Diagrama de construcción del correlograma cruzado. Los cuadros equivalen a un valor de reflectividad de FER (verde) y FEP (rojo). Los cuadros amarillos indican que el valor se utilizó para el cálculo.	88
Figura 34. Detección de análogos naturales de CO ₂ mediante correlogramas cruzados.	89
Figura 35. Procedimiento de análisis de imágenes hiperespectrales basado en Análisis de Componentes Principales y ratio entre bandas.	91
Figura 36. Procedimiento de reclasificación de imágenes a partir de ACP los valores obtenidos de este análisis sobre análogos naturales conocidos.	92
Figura 37. Proceso para generar mapas a partir de los valores de ratios de los análogos naturales conocidos.	94

Figura 38. Corrección de distorsiones geográficas en una imagen del sensor AHS. (a) Imagen original. (b) Imagen después de aplicar la corrección geométrica.	97
Figura 39. Firma espectral de suelo (verde) en radiancia $\mu\text{W cm}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$. Firma espectral después de aplicar método de corrección atmosférica, en expresado en reflectancia: (rojo) FLAASH y (azul) QUAC.....	98
Figura 40. Firma espectral de vegetación (verde) en radiancia $\mu\text{W cm}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$. Firma espectral después de aplicar método de corrección atmosférica, en expresado en reflectancia: (rojo) FLAASH y (azul) QUAC.....	99
Figura 41. Imagen que cuantifica el ajuste sobre la reflectividad de acuerdo a la corrección topográfica en una zona de colinas del Campo de Calatrava.	100
Figura 42. Adquisición de firmas espectrales de referencia en campo. Coberturas a: cebada, b: olivo, c: carrizo en barranco pequeño, d: quercus, e: suelo desnudo 1, f: pastizal, g: sima alta, h: almendro, i: piscina.....	102
Figura 43. Detalle de la zona de adquisición de la firma espectral de referencia de: a) almendro, b) quercus, c) suelo desnudo 01, d) cebada, e) viñedo, f) olivo, g) suelo desnudo 02. Escala 1:770	104
Figura 44. Comparación de píxeles con corrección atmosférica (líneas de colores) con el método FLAASH (superior) y QUAC (inferior) respecto a la firma espectral “Almendro” (línea negra discontinua).....	107
Figura 45. Comparación de píxeles con corrección atmosférica (líneas de colores) con el método FLAASH (superior) y QUAC (inferior) respecto a la firma espectral “suelo desnudo 1” (línea negra discontinua)	108
Figura 46. Comparación de píxeles con corrección atmosférica (líneas de colores) con el método FLAASH (superior) y QUAC (inferior) respecto a la firma espectral “Cebada” (línea negra discontinua).....	109
Figura 47. Comparación de píxeles con corrección atmosférica (líneas de colores) con el método FLAASH (superior) y QUAC (inferior) respecto a la firma espectral “Sima alta” 3,5m (línea negra discontinua) y “Sima 01” 1,5m (línea roja discontinua).....	112
Figura 48. Vegetación en estado normal y atrofiado del género Ulex cercano a La Sima.	113
Figura 49. Comparación de píxeles con corrección atmosférica (líneas de colores) con el método QUAC respecto a la firma espectral “Ulex vivo” (superior) y “Ulex muerto” (inferior).....	114
Figura 50. Comparación de píxeles con corrección atmosférica (líneas de colores) con el método FLAASH (superior) y QUAC (inferior) respecto a la firma espectral “Piscina BP” (línea negra discontinua).....	115
Figura 51. Firmas espectrales obtenidas del radiómetro de campo para las coberturas: carrizo BP (a), plantita y limo BP (b), Piscina BP (c) y Sima 01 (d). BP: Barranco Pequeño.	120

Figura 52. Correlograma de cuatro píxeles (FEP) respecto a la FER “Olivo”	121
Figura 53. Imagen reclasificada con la firma espectral de referencia “Piscina”. Elipse roja izquierda: FER; derecha: “Cañada Real”. Zonas blancas: cuerpos de agua. Zonas azules: vegetación. Zonas amarillas: suelos y otros.	124
Figura 54. Hervidero “Cañada Real”, fecha de visita 07 de mayo de 2014.....	124
Figura 55. Imagen reclasificada con la firma espectral de referencia “Sima 01”. Elipse roja FER. Zonas blancas: suelos. Zonas verde claro y oscuras: vegetación. Zonas azules: agua.	125
Figura 56. Imagen reclasificada con la firma espectral de referencia “Olivo” (izquierda) y “Carrizo”.	126
Figura 57. Imagen reclasificada con la firma espectral de referencia “Suelo desnudo 5”.	127
Figura 58. Componentes principales de dos imágenes AHS, P02BD (izq.) y P03BD (der.).	134
Figura 59. Composición en falso color del ACP de dos imágenes AHS, P02BD (izq.) y P03BD (der.). R: componente principal 1, G: componente principal 2, B: componente principal 3.	135
Figura 60. Gráficos de densidad de la reflectividad en las bandas seleccionadas para los ratios a partir del ACP de dos imágenes AHS, P04BD (izq.) y P03BD (der.).	138
Figura 61. Diagrama de flujo de la elaboración de la nueva imagen RGB basada en los ratios.	139
Figura 62. Imagen de con los valores obtenidos de los ratios sobre el río Jabalón. Composición en falso color de los tres ratios (1). ratio A (2), ratio B (3), ratio C (4). ..	140
Figura 63. Índice de vegetación normalizado de las zonas Barranco Pequeño y Baño Chico.	141
Figura 64. Localización de análogos naturales: hervidero cerca de río Jabalón (REF) (a), Baño Chico (b) y Barranco Pequeño (c).	142
Figura 65. Diagrama de flujo de la reclasificación de los ratios para señalar las posibilidades de emisiones de CO ₂	144
Figura 66. Fragmento de la imagen de indicios de emisiones de fugas de gases de Campo de Calatrava para el año 2011.	145
Figura 67. Arroyo Palomarejo (superior), hervideros en las riberas del río Jabalón zona a (centro) y zona b (inferior).....	148
Figura 68. Arroyo de Palomarejo. Fotografía área del PNOA (izq.) y la imagen reclasificada (der.)	151
Figura 69. Medición de concentraciones de CO ₂ en hervidero zona a (izq.) y arroyo Palomarejo (der.).....	151
Figura 70. Hervideros en las riberas del río Jabalón (Zona A). Fotografía área del PNOA (izq.) y la imagen reclasificada (der.)	152
Figura 71. Hervideros en las riberas del río Jabalón (Zona B). Fotografía área del PNOA (izq.) y la imagen reclasificada (der.)	154

Lista de Tablas

Tabla 1 Fases y tecnologías aplicables en la precombustión. (Eide, 2005)	11
Tabla 2. Idoneidad de métodos de monitorización disponibles para la detección y cuantificación de CO ₂ en un emplazamiento de almacenamiento. (IEAGHG, 2012)	25
Tabla 3. Relación de causas y consecuencias de las distorsiones en las imágenes digitales obtenidas por sensores remotos ópticos.	33
Tabla 4. Valores climatológicos normales, Ciudad Real. Periodo: 1981-2010. Altitud (m): 628. Latitud: 38° 59' 21" N - Longitud: 3° 55' 13" O. Fuente: Agencia Estatal de Meteorología.	51
Tabla 5. Aves esteparias presentes en la provincia de Ciudad Real. Fuente: Datos de la Directiva Hábitat, 2008 (JC-CLM, 2013)	55
Tabla 6 Listado de municipios que conforman el campo de Calatrava. Fuente: Instituto Geográfico Nacional e Instituto Nacional de Estadística. Elaboración propia.	57
Tabla 7. Datos del plan de vuelo del INTA, junio 2011.	59
Tabla 8. Especificaciones de las bandas espectrales del sensor AHS.	62
Tabla 9. Comparación de la configuración de sensores AHS y CASI 1500i. Fuente: INTA.	63
Tabla 10. Características del espectrorradiómetro de campo ASD FieldSpec 3.	67
Tabla 11. Ubicación de las coberturas de las muestras de campo. Fuente: Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial.	68
Tabla 12. Ángulos de azimut y elevación solar de las imágenes AHS y CASI para la fecha 02-06-2011.	81
Tabla 13. Ubicación de los análogos naturales en los trabajos de Elío, J (2015) y Gutiérrez del Olmo, J. (2015)	85
Tabla 14. Indicadores de las correcciones radiométricas (correlación de Pearson y distancia euclidiana) de las imágenes AHS respecto a las FER, diferenciados por los métodos de corrección atmosférica	103
Tabla 15. Valores de los parámetros RGB de cuatro píxeles de una imagen AHS respecto a la FER Olivo.	122
Tabla 16. Aporte de varianza de cada banda a cada componente principal de las imágenes hiperespectrales AHS corregidas atmosféricamente con QUAC y FLAASH.	130
Tabla 17: Resumen de las bandas espectrales de AHS obtenidas de las componentes principales de las imágenes hiperespectrales AHS corregidas atmosféricamente con los métodos QUAC y FLAASH.	132
Tabla 18. Bandas seleccionadas por los autores a partir del ACP de las imágenes AHS.	136

Tabla 19. Rangos de valores para la reclasificación de las imágenes obtenidas de los ratios..... 143

Tabla 20 Relación de puntos seleccionados observados durante dos campañas de campo e 22-09-16 y 03-11-16. 147

Glosario de acrónimos usados en esta tesis.

ACP Análisis de componentes principales

AHS Airborne Hyperspectral Scanner

CAC Captura y almacenamiento de carbono (CO₂)

CASI 1500i Compact Airborne Spectrographic Imager Imager

CCSM Cross-Correlogram Spectral Matching (Correlogramas cruzados)

EEM Espectro electromagnético

FEP Firma espectral de prueba

FER Firma espectral de referencia

FLAASH Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes

GEI Gases de efecto invernadero

GLT Ground lookup table (Tabla de Revisión Geográfica)

IGM Input Geometry Map IGM (Mapa de Entrada de Geometría)

IGN Instituto Geográfico Nacional

INTA Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial

IV Índice de vegetación

MDT Modelo digital del terreno

ND Número o nivel digital

NDVI Índice de vegetación de diferencia normalizada (Normalized Difference Vegetation Index)

PNOA Plan Nacional de Ortofotografía Aérea

QUAC Quick Atmospheric

REI Red Edge Index

SNR Signal to noise ratio (relación señal a ruido)

UTM Universal Transversal Mercator

Resumen

Los proyectos de captura y almacenamiento de dióxido de carbono (CAC) se presentan como una opción para mitigar los efectos del calentamiento y el cambio climático. La teledetección se presenta como una metodología para identificar emisiones de CO₂, en un contexto de monitorización de un proyecto CAC en su fase de almacenamiento. El objetivo principal de estas actividades radica en verificar la efectividad y en minimizar los peligros sobre la salud humana y el medio ambiente.

Para alcanzar los objetivos previstos de monitorización, se adquirieron imágenes hiperespectrales aeroportadas sobre la zona volcánica del Campo Calatrava, Ciudad Real. La zona presenta análogos naturales de emisiones de CO₂ extrapolables a un proyecto de almacenamiento. A partir de estos datos se han elaborado dos propuestas metodológicas:

- Análisis de todas las bandas espectrales y aplicación de las correlaciones cruzadas con firmas espectrales de referencia.
- Selección de bandas espectrales a través de Análisis de Componentes Principales (ACP) y la elaboración de cocientes entre estas bandas.

El método de las correlaciones cruzadas realizó una clasificación de materiales, pero no identificó indicios de emisiones de CO₂. El ACP permitió identificar y seleccionar bandas espectrales, de forma automatizada, basado en el criterio de contener la mayor variabilidad en los datos. A partir de las bandas espectrales de la imagen original, seleccionadas por el ACP, se construyen tres ratios de bandas normalizados entre los tres pares de bandas que mayor varianza aportan a las primeras tres componentes principales.

De acuerdo a los valores de ratios obtenidos en las zonas de emisiones conocidas, estos son extrapolados al resto de la imagen para identificar indicios de emisiones. Se utilizó la técnica de reclasificación de imágenes señalando las zonas con posibles indicios de fugas, empleando los tres ratios para los canales RGB.

Estas luego fueron visitadas para corroborar la existencia de las mismas. En estas visitas se comprobó que el sistema fue capaz de detectar emisiones desconocidas hasta ese momento.

Abstract

Carbon capture and storage (CAC) projects are portrayed as an option to mitigate the effects of global warming and climate change. Hence, remote sensing could be a methodology to identify CO₂ emissions during the storage phase in one of these projects. The main goal of these activities is to verify the effectiveness and minimize human health and environmental hazards.

In order to accomplish monitoring goals, hyperspectral airborne imagery from the AHS and CASI1500i sensors were acquired over the volcanic area Campo de Calatrava, Ciudad Real. The area presents CO₂ emission natural analogues that can be extrapolated to a storage project. Starting from these data, two methodological proposals were elaborated:

- Analysis of all the spectral bands and application of cross-correlograms with reference spectral signatures.
- Selection of spectral bands through principal component analysis (PCA) and construction of band ratios within these bands.

The cross-correlogram method classified certain materials, but it did not identify hints of CO₂ leakage. PCA allowed the identification and automatic selection of spectral bands from the original imagery, based on the bands having the highest variability in their data. From the spectral bands of the original imagery, three normalized band ratios were built starting from the three band pairs with most variance in the first three principal components.

According to the values obtained from the band ratios where known emissions occur, these were extrapolated to the rest of the imagery in order to identify indications of leaks. The image reclassification technique was used to generate new imagery pointing out the zones with leakage indications, employing the three ratios for the RGB channels.

Afterwards some of these sites were visited to corroborate the existence of leaks. These field observations proved that the proposed method discovered CO₂ leaks unknown to date.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En la actualidad, el modelo económico de la gran mayoría de los países está basado en el consumo de energía proveniente de los combustibles fósiles. Las economías desarrolladas dependen del suministro de los hidrocarburos para las necesidades energéticas de sus actividades productivas. A consecuencia de ello, la comunidad científica internacional está interesada en determinar los efectos sobre el medio ambiente que ha tenido este modelo energético. Entre ellos se encuentra el cambio climático debido al aumento de la concentración de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera.

En los últimos años, organismos multilaterales como la Organización de Naciones Unidas (ONU) alertan sobre los efectos y consecuencias de mantener el esquema actual. Es por ello que junto con los gobiernos de los países intenta abordar estrategias que no amenacen el desarrollo económico de las naciones, al mismo tiempo que sean compatibles con el medio ambiente.

Los gobiernos están abordando y debatiendo los retos que conlleva el cambio climático, desde su primera reunión en la Convención Marco sobre el Cambio Climático de las Naciones Unidas, celebrada en Rio de Janeiro en 1992. El Protocolo de Kioto, que data desde 1997, surgió como el primer acuerdo legalmente vinculante entre algunos gobiernos para disminuir las emisiones de GEI. Los objetivos de este protocolo no han sido alcanzados en su totalidad en la actualidad. No obstante han establecido un marco de acción para abordar una economía más verde y menos dependiente de los hidrocarburos (ONU, 2014).

Es por ello que los gobiernos de muchos países se han esforzado en diversificar las fuentes energéticas promoviendo las inversiones e investigaciones orientadas a la producción mediante fuentes renovables y amigables con el medio ambiente. Además muchas de estas opciones exploran la opción de mitigar la emisión de GEI a través de estrategias más creativas y menos convencionales.

El almacenamiento geológico del dióxido de carbono (CO₂) es una tecnología aplicada a la reducción de emisiones de GEI, que es compatible con otras opciones disponibles actualmente. La técnica consiste en la inyección de cantidades industriales de CO₂ en

reservorios naturales subterráneos, evitando la salida a la atmósfera del gas. El almacenamiento se realiza tanto en acuíferos salinos como en yacimientos petrolíferos maduros casi agotados. Algunos estudios sugieren que el almacenamiento geológico supone un impacto significativo en la reducción de las emisiones de GEI, al facilitar la transición de la actual dependencia de combustibles fósiles a un sistema energético de bajo o cero carbono en el futuro. Si el almacenamiento de CO₂ ha de realizar una importante contribución en reducir emisiones, tendría que realizarse a gran escala de forma segura y económicamente rentable (IPCC, 2005).

El CO₂ es inyectado en el espacio poroso de la roca de la formación donde se realizará el almacenamiento, a través de uno o varios pozos. El fluido de CO₂ atraviesa la roca y se disuelve en parte del fluido existente originalmente en el espacio poroso (usualmente agua salada o hidrocarburos), quedando atrapado en dichos poros o, retenido en el medio mediante la formación de carbonatos producto de las reacciones químicas del gas con otros minerales presentes en la formación (Andersen, H. et al, 2005). El CO₂ inyectado es inestable, pudiendo migrar hacia la parte superior de la formación hasta alcanzar el lecho superior impermeable que impide la continuación de su migración vertical. Las barreras de permeabilidad, tales como las fallas, pueden causar un incremento en la presión en los poros, especialmente alrededor del pozo de inyección, lo que puede limitar tanto la cantidad de gas inyectado a la roca como el caudal al cual puede ser inyectado. Las formaciones que contienen sistemas de fallas, así como las de baja permeabilidad no son apropiadas para la inyección de CO₂.

En este orden de ideas, una vez determinadas las posibles localizaciones en las que el almacenamiento geológico puede resultar seguro y efectivo; es importante establecer medidas de control del CO₂ almacenado, implementando medidas de monitorización. Los objetivos de monitorización son:

- Proporcionar certidumbre a la efectividad del almacenamiento a largo plazo del CO₂ en el subsuelo,
- Identificar y medir cualquier fuga a la superficie potencialmente peligrosa que represente un riesgo a la salud humana, el medio ambiente o al proyecto de almacenamiento en sí.

De acuerdo a esta necesidad de monitorización, existe una amplia gama de técnicas que han sido desarrolladas para detectar CO₂ en el suelo o en el aire, muchas de las cuales tienen una eficiencia comprobada. No obstante, estos métodos presentan una serie de limitaciones respecto a las fugas de CO₂, relacionadas con el flujo (bajas [100 g/d], medias [100 kg/d] o altas [100 t/d] y tipo de emisión (puntual, localizada, difusa, dispersa). La Agencia Internacional de la Energía ha puesto en evidencia la necesidad de incrementar las actividades de investigación relacionadas con el desarrollo de aquellas técnicas de monitorización del almacenamiento geológico de CO₂ no convencionales e innovadoras (IEAGHG, 2012).

La adquisición de información constituye un importante objetivo en el desarrollo de una estrategia de monitorización en una zona de almacenamiento geológico. Para conseguir este objetivo es imprescindible seleccionar métodos de monitorización de CO₂ que consideren las limitaciones técnicas y económicas inherentes a los mismos, permitiendo así un estudio más preciso de posibles localizaciones de fuga de CO₂. Una técnica con usos potenciales importantes es la teledetección, la cual tiene la particularidad de proveer medidas consistentes de las condiciones de una amplia cobertura terrestre, así como permitir la detección de cambios abruptos y tendencias lentas a través del tiempo (Kennedy, R., et al, 2009).

1.1. Objetivos.

En el presente trabajo nos interesamos en la aplicación de técnicas de teledetección y estadísticas en zonas con actividad volcánica generadora de emisiones de gases, como técnicas de identificación de indicios de fugas de CO₂ en emplazamientos de almacenamiento geológico. La utilización de análogos naturales, esto es, zonas con emanaciones naturales de CO₂, se basa en la similitud de estas zonas con un escenario hipotético de fuga de CO₂ en un almacenamiento geológico, una vez que el sistema abiótico y biótico se encuentre en equilibrio. Partiendo del enfoque principal descrito, se determinaron los siguientes objetivos específicos:

- Analizar las metodologías de corrección radiométrica de imágenes hiperespectrales adquiridas por sensores aeroportados más adecuadas para la identificación de posibles localizaciones de fugas de CO₂.
- Analizar y evaluar métodos estadísticos de análisis de la información presente en imágenes hiperespectrales para la detección de posibles zonas de anomalías asociadas a la existencia de emanaciones de CO₂.
- Evaluar y analizar la integración de información procedente del análisis estadístico de imágenes hiperespectrales con otras fuentes de información empleando herramientas de gestión de información geográfica, para la monitorización de emanaciones de CO₂.
- Proponer metodologías para la identificación de posibles zonas de emanación de gases, basadas en técnicas de teledetección con imágenes hiperespectrales, utilizando métodos estadísticos e información procedente de otras fuentes.

La correcta adquisición de datos es importante para detectar aquellos indicios que permitan identificar escapes de gases. Estos indicios de posibles localizaciones de emanaciones de CO₂, posteriormente, deberían estudiarse a fondo para cuantificar las emisiones mediante técnicas más precisas. El objetivo principal de esta investigación es proponer métodos que permitan identificar a partir de imágenes adecuadas las posibles localizaciones de emisión, sobre las que, utilizando otras metodologías, se cuantifique el nivel de emisión.

1.2. Plan de trabajo.

La tesis se organiza en distintos capítulos describiendo la secuencia de los trabajos realizados. En los capítulos dos y tres se describen los antecedentes sobre las estrategias de captura y almacenamiento geológico de carbono (CAC), las técnicas de monitorización y las técnicas de teledetección. Seguidamente, en el capítulo cuatro, se describe la zona de estudio, especificando las características más importantes de la región Campo de Calatrava (Ciudad Real, España). Los motivos para su selección se justifican, ya que presenta emisiones de CO₂ consideradas análogos naturales en un proyecto CAC.

En el capítulo 5 se describe el material empleado, las imágenes hiperespectrales y los procesamientos previos al análisis. Ya centrados en la estrategia, en el capítulo 6, se describen los procedimientos para preparar las imágenes hiperespectrales, que luego serán empleadas en dos propuestas para el análisis enfocadas en la detección de indicios de fugas de CO₂. Por último en el capítulo 7 se presentan los resultados obtenidos y en el 8 se exponen las conclusiones de la tesis y se presentan las posibles líneas de investigación para continuar avanzando en los objetivos propuestos.

En un soporte CD-ROM se adjunta todo aquel material de soporte de la presente tesis, tal como las imágenes aeroportadas, la cartografía oficial utilizada y los distintos productos cartográficos generados durante el desarrollo de la tesis.

CHAPTER 1. INTRODUCTION AND OBJECTIVES

Today, most countries base their current economic model in energy consumption from fossil fuels. The developed economies depend of hydrocarbons to fulfill the energetic needs of their productive activities. Therefore, the scientific community has been interested in determining the effects this energetic model has on the environment. Among the many consequences, a main one is climate change, which originates partially by the rise of greenhouse effect gases (GHG) in the atmosphere.

In recent years, multilateral organisms such as the United Nations (UN) keep alerting about the effects and consequences of maintaining the current energetic scheme. Therefore, along with governments from all around the world, UN approaches several strategies that do not harm economic development and at the same time is compatible with the environment.

Governments address and debate the challenges concerning climate change, since their first meeting at the United Nations Framework Convention on Climate Change, celebrated in Rio de Janeiro in 1992. The Kyoto Protocol arose, since 1997, as the first legally binding agreement among several governments to reduce GHG. Up to now, the goals of this protocol have not been reached completely. However, the signatories established a joint framework to reach a greener economy and less dependent on fossil fuels. (UN, 2014).

Hence, governments from many countries make efforts to diversify energy sources. They promote investments and research towards production of renewable and environmentally friendly energy sources. In addition, many options explore GHG mitigation through more creative and less conventional strategies.

Carbon capture and storage (CAC) is a technology applied to the reduction of GHG emissions, compatible with other options available currently. The technique consists on the injection of industrial quantities of CO₂ in underground natural reservoirs, thus avoiding the release of this gas to the atmosphere. The storage sites could be either in saline aquifers as well as in almost depleted mature oil fields. Some studies suggest the geologic storage represents a significant impact in GHG emissions reduction. It will ease the transition from energy system dependent on fossil fuels to a low or zero carbon one

in the future. If the storage were to make a significant contribution to GHG reduction, it should be performed on a great scale in a secure and economic manner (IPCC, 2005).

CO₂ is injected in the porous space of the rock formation where the storage will be done. The CO₂ fluid goes through the rock and dissolves into the preexisting fluids that originally occupied the porous space (salt-water or hydrocarbons). Once there, it is trapped in the pores or retained as carbonates, which is product of the chemical reactions of the gas with other minerals (Andersen, H. et al, 2005). The injected CO₂ is unstable so it could migrate towards the upper part of the formation until it reaches an impermeable layer. The permeability barriers, such as faults, may increase pressure in the pores, especially around the injection well. Thus, it can limit the amount of gas and the volume injected into the rock. Formations with fault systems, as well as those with a low permeability are not suitable for CO₂ injection.

In this order of ideas, once possible sites for geologic storage in a safe and effective way are determined, it is important to establish control measures for the CO₂ by means of monitoring procedures. The monitoring goals are the following:

- Offer certainty of the effectiveness of the long-term underground storage of the CO₂.
- Identify and measure any leak to the surface, potentially hazardous, which represents a risk to human health, the environment or the CAC project itself.

According to the monitoring need, there is broad selection of techniques developed to detect CO₂ on soil or air, many of which have a proven efficiency. Nevertheless, these methods present several limitations regarding CO₂ leaks, related to flux (low [100 g/d], medium [100 kg/d] or high [100 t/d] and type of emission (punctual, localized, diffuse, disperse). The International Energy Agency revealed the need to increase research in the activities related to the unconventional and innovative monitoring techniques in geologic storage of CO₂ (IEAGHG, 2012).

The acquisition of information is an important objective in the development of monitoring strategy in a geologic storage site. To reach this aim, it is imperative selecting a method that takes into account the technical and economic limitations. Following this, helps the creation of more accurate location of leaks studies. A technique with potential

uses is remote sensing, because it has the particularity to provide measurements of land covers, as well as the detection of changes along time (Kennedy, R., et al, 2009).

1.1. Objectives.

This study embraced the use of remote sensing and statistics in areas with volcanic activity that generates gas emissions, as techniques to detect indications of CO₂ leaks in geologic storage sites. The use of natural analogues, described as areas with natural CO₂ emissions, uses the similarities between these areas and a hypothetical leakage scenario at a storage site, once the biotic and abiotic system is in equilibrium. According to this statement, the following specific objectives were determined:

- Analyze the radiometric correction methodologies of airborne hyperspectral imagery more adequate to identify possible CO₂ leaks.
- Analyze and evaluate statistical methods of hyperspectral imagery data for the detection of possible anomaly zones related to CO₂ emissions.
- Evaluate and analyze the integration of information from the statistical analysis with other sources using geographic information management tools in order to monitor CO₂ leaks.
- Propose methodologies for the identification of possible gas leakage zones, based in hyperspectral remote sensing techniques using statistical methods and information from other sources.

A proper data acquisition is important to determine indications that allow the identification of CO₂ and gas releases. These indications subsequently should be studied in depth using more accurate methodologies to quantify the amounts of emissions. The main goal of this research is to propose methods for the identification of emission points starting from remote sensing imagery, where quantification could be carried out later on with other methodologies.

1.2. Work Scheme.

This thesis is organized in several chapters describing the sequence of the activities performed. In chapters two and three are described the backgrounds about carbon

capture and storage (CAC), the monitoring techniques and remote sensing. Then, in chapter four, the study area is described, specifying the most relevant features of the Campo de Calatrava (Ciudad Real, Spain) region. The motives for its selection are justified, because it presents CO₂ leakage, which is considered a natural analogue in a CAC project.

In chapter five, are mentioned and described the materials used, the hyperspectral imagery and the preprocessing required before the statistical analysis. Centered in the strategy, in chapter 6, are portrayed the procedures to prepare the hyperspectral imagery. Afterwards the imagery will be employed in two proposals for the analysis focused in the detection of CO₂ leakage indications. Finally, in chapter seven, the results obtained are presented, and chapter eight exposes the conclusions and the possible lines of investigation to follow.

In a CD ROM support are attached the materials supporting this investigation, such as airborne imagery, official cartography, and other map products used and produced during the development of this work.

CAPÍTULO 2. CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE DIÓXIDO DE CARBONO (CAC)

Según previsiones de diversos entes internacionales como la Agencia Internacional de la Energía (EIA, 2013), las necesidades energéticas de la población mundial aumentarán en los próximos años. No obstante, se estima que la energía obtenida de combustibles fósiles respecto del total, se reduzca de un 82% actual, a un 76% para el año 2035. Estas cifras constatan la dependencia de las sociedades en este tipo de energía.

Es por ello que en muchos países los combustibles fósiles seguirán siendo una opción viable, desde el punto de vista económico, para cubrir la creciente demanda energética (EIA, 2013). El uso de combustibles fósiles para generar electricidad y para el transporte, conlleva la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) a la atmósfera, como es el caso del dióxido de carbono (CO_2) (IPCC, 2007).

Figura 1. Emisiones de GEI mundiales. a) Emisiones anuales mundiales de GEI antropogénicos entre 1970 y 2004 b) Parte proporcional que representan diferentes GEI antropogénicos respecto de las emisiones totales en 2004, en términos de CO_2 equivalente. c) Parte proporcional que representan diferentes sectores en las emisiones totales de GEI antropogénicos en 2004, en términos de CO_2 equivalente. (En el sector silvicultura se incluye la deforestación). Tomado de IPCC (IPCC, 2007)

El Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC, 2007) define el cambio climático como las variaciones en los patrones climáticos de algunas zonas del mundo debido al progresivo aumento de GEI en la atmósfera. El IPCC lleva investigando las relaciones entre el aumento de la concentración de dióxido de carbono con el aumento de las temperaturas promedio varias décadas. Fruto de estas investigaciones, tal como

se puede observar en la figura 1 se constata un incremento de los GEI del 28,7 % en 1970 al 49,0% en 2004.

Dada la situación, en países con experiencia en la industria petrolera, han surgido iniciativas de investigación en torno a la gestión de los GEI basados en las técnicas de recuperación secundaria de crudo (Bachu, 2003). Un ejemplo de estas técnicas es la inyección con CO₂ de yacimientos agotados, en los que el gas se expande y desplaza los hidrocarburos para aumentar su capacidad de flujo. Ya desde 1960 esta técnica se viene aplicando en los campos Budafa y Lovaszi de Hungría. Igualmente el proyecto SACROC, iniciado en 1972 en Texas EEUU, planteó la inyección CO₂ en el yacimiento maduro Kelly-Snyder a fin de aumentar la producción de petróleo. Esta actividad se mantiene en operación en la actualidad (EIAGHG, 2014; Smith, s.f.).

También se han planteado otras posibilidades, como la separación del CO₂ (antes, durante o después de la combustión de los hidrocarburos) en el generador de emisión, por ejemplo una central eléctrica de fuel, para su posterior transporte e inyección en el subsuelo a través de técnicas variadas (IPCC, 2005).

El Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC, 2005) define la captación y el almacenamiento de dióxido de carbono (CAC) como: “un proceso consistente en la separación del CO₂ emitido por la industria y fuentes relacionadas con la energía, su transporte a un lugar de almacenamiento y su aislamiento de la atmósfera a largo plazo.” Además considera esta estrategia como una opción de mitigación para la estabilización de las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero.

Tabla 1. Fases y tecnologías aplicables en la precombustión. (Eide, 2005)

Proceso/Fase	Tecnologías aplicables
Conversión de Hidrocarburos	Reforma con vapor, SMR. Usada con gas natural y naftas
	Reforma auto termal, ATR. Usada con gas natural
	Oxidación parcial, POX. Usado con todo tipo de combustible
	Reforma en dos fases, SMR + ATR. Usado con gas natural y naftas.
Conversión en CO	Cambio a alta temperatura (350 °C)
	Cambio a media temperatura (250 - 300 °C)
	Cambio a baja temperatura (190 - 210 °C)
Remoción de CO ₂	Adsorción por cambio de presión
	Separación criogénica
	Absorción química
	Adsorción física
	Separación con membranas

Los proyectos CAC constan de cuatro fases muy diferenciadas. Una primera fase de separación de un flujo de CO₂ concentrado, otra segunda e de compresión de este gas, para luego pasar a la tercera de transporte, por gasoductos, desde los puntos de generación hasta el sitio de almacenamiento, y por último la inyección en el formaciones de areniscas o yacimientos petrolíferos agotados donde el gas será almacenado a lo largo de los años. La captura de CO₂ de los grandes generadores de emisiones se puede realizar bajo tres grandes estrategias basadas en la combustión de los hidrocarburos.

La **descarbonización de precombustión** consiste en la captura del CO₂ antes de la quema del combustible fósil en una cámara de combustión. Este método es semejante a los procesos de producción de hidrógeno, amoniaco y gas de síntesis, que principalmente consiste en la reforma/conversión del combustible fósil a gas de síntesis (mezcla de nitrógeno e hidrógeno) y, la posterior separación del CO₂ y el hidrógeno (H₂) para obtener un flujo rico del segundo gas (Andersen, 2005). Ver Tabla 1.

La precombustión tiene la ventaja de que puede convertir en gas de síntesis a casi todos los tipos de combustibles fósiles. De forma análoga a la producción de combustible de hidrógeno, la captura de CO₂ se puede llevar a cabo en una planta centralizada, lo que mejora el rendimiento económico de los proyectos de captura. Además cabe la posibilidad de que algunas plantas con turbinas puedan usar el combustible de hidrógeno sin sufrir modificaciones considerables. Las investigaciones llevadas a cabo por distintas organizaciones a nivel mundial se orientan a desarrollar nuevos mecanismos que incidan en la reducción de costos del proceso de separación del CO₂ en la precombustión, siempre considerando las condiciones especiales para cada caso (Eide, 2005). En esta área, las líneas de investigación principales son:

- El reformado integral en ciclo combinado (Integrated Reforming Combined Cycle): este sistema, también conocido como Hydrokraft, aplica los procesos de conversión de hidrocarburos previamente mencionados, con el objetivo de encender la mezcla de gases resultante, rica en hidrógeno, en una turbina de gas generando escasas emisiones de CO₂.
- Las membranas de hidrógeno: Se busca el desarrollo de materiales que permite realizar la reacción química de obtención del hidrógeno y la separación de éste

en una sola fase. Los retos que se presentan incluyen la estabilidad, eficiencia y costos del material.

- Generación de combustibles de H_2 a través de un absorbente mejorado en la reacción de cambio de agua gas. Los materiales absorbentes como las hidrotalcitas han probado tener una eficiencia elevada en la retención del CO_2 .

La **oxicombustión** es el proceso de quema del hidrocarburo con un flujo de oxígeno puro en vez de un flujo de aire. Este proceso tiene como ventaja la generación de un flujo de gases compuesto prácticamente en su totalidad por CO_2 y H_2O . En el caso de la captura de CO_2 este procedimiento favorece la separación de gases por simple condensación del vapor de agua, por lo tanto resulta más sencilla y económica. Además se pueden reducir considerablemente las emisiones de NOx en comparación con la combustión convencional con aire. Sin embargo, los costes operativos pueden aumentar por los requerimientos de la separación criogénica del aire y el reciclaje de los gases de combustión para mantener las temperaturas operativas en las unidades (calderas, turbinas). No obstante, muchas investigaciones se dirigen al desarrollo de membranas seleccionadoras de oxígeno, ya que estas resultarían más económicas que el proceso de criogenización (Miracca, I. et al., 2005).

En la **postcombustión** se efectúa la separación del CO_2 a partir de las emisiones de las unidades (calderas, turbinas y calentadores) de distintos tipos de fuentes generadoras, tales como refinerías, plantas químicas, plantas de energía, y otros. El proceso de recuperación se ejecuta por distintos procedimientos que abarcan desde la separación química y física del CO_2 (absorción, adsorción) hasta métodos biológicos (ver figura 2) tras la combustión de los hidrocarburos. Las emisiones finales a la atmósfera solo contienen agua y nitrógeno.

Estos enfoques tienen como ventajas que las infraestructuras originales de las fuentes generadoras requerirían de pocas modificaciones para realizar la captura de CO_2 . No obstante, se presentan dificultades respecto al tratamiento de otros compuestos (SOx , NOx y cenizas,) así como los altos costos de reposición de sustancias químicas utilizadas. Actualmente, la tecnología de separación con aminas tiene capacidad baja de tratamiento de flujos de emisiones (100 t/d) en relación a las necesidades de un proyecto de captura de CO_2 (10000 t/d).

No obstante las oportunidades de investigación en este campo se orientan a la reducción de costos mejorando las tecnologías existentes de aminas (ej. mejores solventes, mejores contactores de solvente, diseño de plantas). También se vienen desarrollado investigaciones en nuevos enfoques de captura en post combustión, como por ejemplo los absorbentes nanoporosos auto ensamblados (IPCC, 2005; Wang, M. et al., 2011; Eimer, D., 2005)).

Independientemente del método de captura del CO₂, el gas debe ser procesado para cumplir con las condiciones necesarias para su transporte hasta el sitio de almacenamiento. En esta fase, la estrategia que se considera más factible para el transporte a gran escala es la utilización de gasoductos, mientras que en planes pilotos, se utilizan barcos o vehículos, que posiblemente no sean suficientes para grandes volúmenes. El CO₂ a transportar principalmente debe contener escasos volúmenes de agua para evitar la formación de hidratos, ya que podrían generar corrosión de los ductos (EIAGHG, 2014; Heggum, G. et al., 2005).

Figura 2. Tecnologías de separación de CO₂ en la postcombustión, basado en RAO A.B., 2002. Fuente: Wang, M et al. 2011.

Según lo expuesto por Geir, H. et al. (2005), algunos sistemas de transporte de CO₂ existentes, como son los terrestres situados en Canadá y EEUU, y los marítimos de Noruega (Hammerfest GLN), son una importante fuente de información sobre los parámetros de operatividad sobre el transporte de CO₂. La cantidad de humedad presente en la mezcla de gases es un factor importante porque influye en la corrosión de las tuberías. Los requerimientos más estrictos se establecen en 50 ppm de agua, como en el caso de los gasoductos de Hammerfest o Weyburn, mientras que los más

flexibles se establecen en 600 ppm (gasoductos de Sheep Mountain, Monell, Bairoil) (EIA, 2013).

Asimismo, existen modelos y herramientas termodinámicas que calculan las propiedades de mezclas de gases ricos en CO₂, que además han sido corroborados con datos experimentales. El gasoducto debe quedar libre de agua a fin de inhibir la formación de hidratos y prevenir altas tasas de corrosión del acero al carbono. Es por ello que la remoción de agua se debe realizar corriente arriba (upstream) de la entrada al gasoducto. Para un caso típico, según estimaciones teóricas y en condiciones supercríticas, el límite para la precipitación libre del agua promedio es de 1300 ppm. Estos datos sugieren que los requisitos de secado pueden ser menores y por lo tanto podría ayudar a ofrecer alternativas de deshidratación que pueden reducir los costes del transporte.

No obstante, las zonas con capacidad de almacenamiento no siempre están accesibles o cercanas a los emisores de CO₂. Por lo que es necesaria una red de transporte de gases que conecte emisores con sumideros. A nivel europeo, los programas pilotos e iniciales a escala comercial utilizan las zonas más cercanas posibles para almacenamiento, por tanto las infraestructuras se desarrollan a escala nacional. Los próximos objetivos se centran en la interconexión entre los estados miembros para aprovechar al máximo el potencial de almacenamiento que tiene Europa. La posible financiación de estas infraestructuras de transporte se regulan como proyectos de interés comunitario (Comisión Europea, 2009).

La siguiente fase consiste en el almacenamiento en alguna formación rocosa porosa, preferiblemente de arenisca, o en algún yacimiento petrolífero o gasífero en desuso. Las formaciones porosas que retienen o han retenido fluidos previamente, como el gas natural, petróleo o agua salada, son candidatas adecuadas para el almacenamiento geológico del CO₂. Estas formaciones pueden estar presentes tanto en cuencas terrestres como marinas. (CO₂GEONET, 2009).

El almacenamiento también puede ser útil en técnicas de recuperación mejorada de petróleo (Enhanced Oil Recovery). Según el proyecto EU Geocapacity (Vangkilde-Pedersen, T., 2009), la capacidad estimada de almacenamiento geológico permanente en Europa es equivalente a 300 Giga toneladas (Gt) de CO₂, si bien algunas estimaciones

más conservadoras reducen esta cifra a 117 Gt CO₂. Debido a que las emisiones totales de CO₂ (a partir de la generación de energía y la industria) en la UE son alrededor de 2,2 Gt CO₂ por año, resulta factible que se pueda almacenar CO₂ durante un largo periodo de tiempo.

En esta materia, los sumideros naturales del CO₂ contribuyen a un mejor entendimiento del comportamiento de este compuesto en el subsuelo. Las siguientes características están presentes en los emplazamientos con baja probabilidad de fugas:

- Formación rocosa impermeable en la parte superior.
- Estabilidad geológica.
- Ausencia de rutas de fuga.
- Mecanismos de retención.

Existen dos escenarios de fugas:

1. Fugas repentinas: Debidas a fallas en los pozos de inyección o provenientes del ascenso del gas a través de pozos subterráneos.
2. Fugas graduales: Se producen a través de fallas, fracturas o pozos que no han sido detectados.

Es por ello, que antes de la implementación de un proyecto de almacenamiento de CO₂ se debe realizar una investigación exhaustiva para determinar las características geológicas del emplazamiento, donde se deben identificar las potenciales rutas de fuga. Esta información permite jerarquizar las rutas de migración de CO₂ más probables. Las observaciones llevadas a cabo en análogos naturales, así como en modelos, sugieren que es muy probable que la fracción retenida en los depósitos geológicos debidamente y bien gestionados, exceda el 99% en cien años, y posiblemente supere esa cifra en un tiempo de mil años. El comportamiento a largo plazo del CO₂ almacenado geológicamente determinará las necesidades de monitorización a lo largo de los años o décadas. Se espera que el fluido migre lentamente hacia formaciones del subsuelo, nominalmente 0,1 km por año (Etheridge, D, 2005).

Uno de los mayores obstáculos es que las formaciones rocosas pueden tener una composición y estructura heterogénea; por lo que resulta difícil rastrear la ruta de migración. Dependiendo del emplazamiento, un punto de fuga puede ser localizado a unos pocos metros o a varios kilómetros de la zona de inyección. La estabilidad geológica

de la zona es fundamental para minimizar las probabilidades de fugas a través del material del subsuelo.

Las fumarolas grandes generalmente suelen ser de emisiones continuas, por lo que resultan más fáciles de detectar y su ubicación puede ser bien determinada. En algunas áreas las fumarolas grandes están asociadas a otros escapes más pequeños, caracterizadas por emisiones más difusas. Las fumarolas pequeñas y las nuevas emergentes, en zonas propensas a generar estos escapes, pueden ser encontradas por investigaciones de campo y observación basada en instrumentos de detección de gases. Usualmente, esto se puede realizar buscando señales conocidas como pequeños cráteres, orificios abiertos, burbujas en el agua, sedimentos, sonido de chisporroteos, cadáveres de animales e insectos asfixiados, y patrones peculiares de la vegetación (Tank, V, 2008).

2.1. Experiencias de proyectos de captura y almacenamiento de CO₂.

En la actualidad, existen aproximadamente más de 20 proyectos de CAC a gran escala (en operación) con una capacidad de captura de casi 40 millones de toneladas de CO₂ al año. Norteamérica es la región donde más desarrollos se han ejecutado, contando con dos plantas a gran escala de CAC en el sector energético (Global CCS Institute, 2014). Asimismo, en Oriente Medio se construye otro proyecto CAC para el sector metalúrgico de hierro y acero por parte de las compañías Emirate Steel Company, Abu Dhabi National Oil Company ADNOC y Masdar, donde integran la captura de CO₂ de la planta metalúrgica con su empleo para la producción secundaria de hidrocarburos y su almacenamiento final (Emirate Steel Company, s.f.).

Entre los proyectos CAC más avanzados se encuentran los de Lake Charles, NRG Energy Parish y Texas Clean Energy, todos ubicados en los Estados Unidos de América; igualmente en China se encuentra el proyecto Sinopec Qilu Petrochemical y en los Países Bajos el proyecto ROAD. A pesar del avance de muchos proyectos son varias las regiones europeas en las que los proyectos han sido cancelados o se encuentran detenidos (Global CCS Institute, 2014).

La mayoría de los proyectos CAC, ya sea en planificación o en operación, pretenden usar el CO₂ capturado en origen en la recuperación mejorada de hidrocarburos. Este enfoque es más evidente en aquellas regiones como Norteamérica, el Oriente Medio y China, donde las oportunidades de uso del CO₂ son elevadas, ver figura 3. (Global CCS Institute, 2014).

En la actualidad existen muchos proyectos a escala de investigación y comercial. Entre los más destacados se encuentran proyectos en Norteamérica y Europa. En Noruega, empresas como STATOIL tiene una amplia experiencia en proyectos CAC desde los años 90 del siglo XX. Uno de los proyectos más antiguos en funcionamiento actualmente es el de Sleipner, que consiste en la remoción del CO₂ excedente (separación con aminas) presente en el gas natural y, su posterior inyección en la formación Utsira (arenisca a 800m de profundidad).

Figura 3. Proyectos CAC a gran escala clasificados según la etapa de desarrollo y a región/país en febrero de 2014. Fuente: (EIAGHG, 2014)

Es destacable que la principal motivación para capturar el CO₂ del gas natural era que el gas no cumplía con los estándares de comercialización, y el almacenamiento vino forzado a causa de la implantación de un impuesto al CO₂ que Noruega instauró para combatir las emisiones de dicho gas. Para el año 2013, más de 14 millones de toneladas de CO₂ han sido almacenadas desde la implantación de este proyecto en 1996 (Statoil, s.f.). Adicionalmente la empresa STATOIL está involucrada en otros proyectos tales como el ejecutado en Snøhvit desde el año 2006, ya que es similar al de Sleipner donde se captura el CO₂ proveniente de un flujo de gas natural y posteriormente es almacenado en la formación Stø (a 2500m de profundidad). Entre 2007 y 2013, se han almacenado 2 millones de toneladas de CO₂ en este proyecto (Statoil, s.f.).

Desde el año 2000, Cenovus Energy lleva a cabo el proyecto de recuperación mejorada de petróleo con CO₂ en el campo petrolero Weyburn al sur de Saskatchewan, Canadá. Este está considerado como uno de los proyectos CAC más grande del mundo. Las expectativas de este proyecto abarcan la inyección neta de 18 millones de toneladas de CO₂, así como producir 21 millones m³ de petróleo adicionales, extendiendo la vida útil del campo petrolero unos 25 años. Este proyecto es de gran importancia ya que científicos e investigadores de todas partes del mundo han podido estudiar la gran cantidad de datos que ofrece la infraestructura instalada, especialmente la relativa al almacenamiento geológico y las técnicas de monitorización. Además, este proyecto ha permitido los investigadores probar nuevas técnicas y así como realizar experimentos relacionas con estos temas.

En España, el gobierno desarrolla el proyecto OXYCFB300 Compostilla a través de la Fundación Ciudad de la Energía CIUDEN, junto a otras iniciativas privadas. Dicho proyecto ha sido financiado parcialmente por el Programa Europeo Energético para la Recuperación (PEER) de la Comisión Europea. El objetivo principal de este proyecto es la demostración comercial de un proyecto de CAC en sus fases de captura, transporte y almacenamiento. El proyecto consiste en una planta de oxidación supercrítica de lecho fluido circulante de 300MWe con almacenamiento geológico en un acuífero salino. El complejo se encuentra ubicado en el noroeste de España en las localidades de Cubillos del Sil en León (planta, ver figura 4) y Hontomín en Burgos (lugar de almacenamiento) (ENDESA; CIUDEN; Foster Wheeler, 2013).

Figura 4. Planta de captura de CO₂ del proyecto OXYCFB300 Compostilla. (ENDESA; CIUDEN; Foster Wheeler, 2013)

Desde el 2009, un grupo de universidades españolas e italianas, en colaboración con la compañía AMPHOS XX1, han colaborado en una de las ramas del proyecto relativas a las estrategias de monitorización de CO₂ y otros gases mediante el estudio de análogos naturales. Dentro de este proyecto, la Universidad Politécnica de Madrid ha participado centrando su trabajo en el estudio de mediciones in situ de concentraciones de CO₂ difusas en la atmósfera con una cámara de acumulación con el fin establecer una metodología de medición fiable y determinar las concentraciones de línea base en la zona de futuro almacenamiento.

2.2. Técnicas de monitorización de fugas en emplazamientos de almacenamiento geológico de dióxido de carbono.

En el diseño, desarrollo y funcionamiento de un proyecto CAC, deben existir una serie de controles para evaluar que se cumplan los objetivos establecidos respecto a la ejecución correcta de los procesos del proyecto. Las fugas de CO₂ desde un emplazamiento de almacenamiento hacia la superficie están asociadas a riesgos en la salud humana y el medio ambiente. Entre las situaciones que pudieran suceder, según Pruess, K. (2006), se mencionan los siguientes:

- Acidificación de las aguas subterráneas.
- Riesgo de asfixia en zonas de la superficie terrestre, especialmente en zonas poco ventiladas o depresiones.
- Aumento de la concentración atmosférica de CO₂ en la zona.
- Daños debido a una descarga eruptiva de alta energía, siempre y cuando sea físicamente posible.

Por otra parte, estos controles deben permitir la obtención de información que contribuya a la investigación y mejora de ese tipo de proyectos (Arts, R., 2005). Es importante que durante la fase de captura se realice la separación de CO₂ en altos porcentajes, también es importante en la fase de transporte desde el punto de emisión al lugar de almacenamiento evitar posibles escapes de CO₂ (EIAGHG, 2014) (IPCC, 2005).

Los controles en las zonas de almacenamiento geológico están dirigidos a verificar que no se produzcan escapes de gas que comprometan la efectividad del proyecto CAC, ni representen riesgos tanto a los seres humanos como al medio ambiente. Por lo tanto, se debe realizar una caracterización de la formación rocosa y del entorno donde se determinen las características del mismo y los valores de fondo naturales de CO₂ presentes en el suelo. El emplazamiento debe cumplir una serie de condiciones: un estrato superior impermeable que evite el escape del gas, presentar una formación rocosa porosa y permeable con alta capacidad de almacenamiento, accesibilidad a los puntos de generación de emisiones y/o buenas conexiones, y tener estabilidad sísmica y poca fracturación (fallas) (Arts, R., 2005).

Como el objetivo principal de un proyecto CAC es retener el CO₂, existen diversas metodologías y técnicas que permiten evaluar la integridad del almacenamiento en la formación rocosa. Las tareas de control se clasifican según qué zona del emplazamiento que se van a evaluar. Las técnicas a utilizar deben tener en cuenta que es necesario estudiar (i) el subsuelo, (ii) la superficie y (iii) atmósfera (EIAGHG, 2014) (Shuler, P., 2005). Ver Figura 5.

En el primer grupo las técnicas, encargadas del estudio del subsuelo, son muy similares a las utilizadas en la industria de exploración y producción de hidrocarburos, y ofrecen datos sobre el comportamiento del fluido inyectado en la formación para

almacenamiento, por lo que ayudan a determinar la efectividad del proceso de almacenamiento del CO₂ a lo largo del tiempo en la formación. Se incluyen métodos como las prospecciones sísmicas, las modelizaciones de plumas de CO₂, la verificación de presiones en pozos inyectoros, el análisis de aguas subterráneas de acuíferos cercanos al emplazamiento y otras muchas técnicas.

Figura 5. Esquema de técnicas de monitorización de CO₂. Fuente: British Geologic Survey. (IPCC, 2005)

En cambio, el grupo de metodologías de superficie y atmosféricas se enfocan en la detección de fugas de CO₂ u otros gases trazas asociados a las formaciones de almacenamiento. Los esfuerzos se dirigen en determinar que el gas almacenado no se escape por fallas o pozos, o que se vea comprometida la estabilidad de la capa sello en la formación. Las técnicas se agrupan de acuerdo a su naturaleza, por ejemplo, están las técnicas geoquímicas de estimación de concentración de CO₂ en suelo in situ por métodos estacionarios o móviles, o las técnicas de medición de magnitudes físicas in situ como la medición de concentración de CO₂ por espectroscopia “Covarianza de Eddy”. Entre las técnicas utilizadas, se encuentra algunas de largo alcance territorial como la adquisición de datos por teledetección (IEAGHG, 2012; Shuler, P., 2005).

De lo anterior expuesto, existen muchas técnicas que están dirigidas a la detección de las fugas y/o su lugar de origen, así como el volumen de gas fugado con el fin de cerciorar la efectividad del proyecto CAC y ofrecer información que colabore con la aceptación de la opinión pública del control de los posibles riesgos existentes (IEAGHG, 2012). La Tabla

2 resume algunas de estas técnicas y los casos en que su uso es adecuado. Adicionalmente todas éstas técnicas también son aplicables para la elaboración de los estudios de línea base de CO₂, lo que permite diferenciar cuando un flujo de este gas es debido a fluctuaciones naturales de la actividad microbiana y vegetal del suelo, de posible fugas de CO₂ provenientes de la inyección.

Es conveniente que el enfoque para establecer una metodología de control de fugas abarque dos o más de algunas de estas técnicas. Este criterio es importante ya que ningún método es 100% infalible poseyendo distintos grados de sensibilidad. Además, los métodos se adecúan apropiadamente según la extensión de territorio a estudiar, el tipo de fuga (difusa o puntual) y el flujo de la fuga.

Al diseñar la estrategia de monitorización también conviene considerar distintas etapas basadas en técnicas que aborden la problemática desde distintas escalas, partiendo de aquellas que puedan abarcar grandes extensiones para detectar posibles indicios de fugas, como es el caso de la teledetección, para posteriormente utilizar otras técnicas más localizadas (estimación de flujos de CO₂ con cámara de acumulación) permitiendo cerciorarse si en realidad hay fugas o no. En un paso posterior debería procederse a cuantificar las fugas en caso de que existieran.

La teledetección se contempla como una opción viable junto a otras técnicas para identificar zonas potenciales de fugas de CO₂. El planteamiento básico es que en una primera fase la teledetección permitiría identificar zonas o puntos potenciales de fuga, que luego podrían ser corroborados a través de métodos in situ más localizados y precisos. El gran desafío que presenta el uso de la teledetección es determinar que elementos de la superficie terrestre se identificarán y como se relacionan con el CO₂ (IEAGHG, 2012; Spangler, L. et al., 2009).

En ese sentido, Spangler, L. et al (2009), apoyados por el grupo de investigación ZERT (Zero Emissions Research and Technology Center), ha propuesto evaluar distintas técnicas de detección de fugas de CO₂ en emplazamientos de almacenamiento geológico que permitiesen obtener datos para desarrollar estrategias de monitorización y comprender los mecanismos que influyen en el transporte de este gas a través del suelo, aguas y plantas. Para ello, construyeron una infraestructura de liberación controlada de CO₂ que simulaba las condiciones que podría presentar una fuga e instalaron los

distintos dispositivos que utilizaron para la detección de CO₂ sobre este terreno. Las técnicas consideradas fueron las siguientes: medidas de flujo de CO₂ en el suelo con la cámara de acumulación, medidas de flujo de CO₂ netas por covarianza de Eddy, trazadores perfluorocarbonados, medidas de absorción diferencial usando instrumentos basados en laser, atmósfera y gas del suelo, isótopos estables, análisis de la química del agua y estudio de la salud de las plantas.

Entre sus conclusiones destacan que la mayoría de las técnicas fueron capaces de detectar niveles elevados de CO₂ en el suelo o la atmósfera, hasta en tasas de flujos relativamente bajas. Inclusive fueron capaces de detectar el estrés de las plantas inducido por el CO₂ a pesar de las condiciones adversas de temperaturas altas y sequedad.

Tabla 2. Idoneidad de métodos de monitorización disponibles para la detección y cuantificación de CO₂ en un emplazamiento de almacenamiento. (IEAGHG, 2012)

Monitorización acuática	Método de monitorización		Métodos Sonar			Química de superficie acuática	Química de corriente de burbujas marinas
	Cuantificación de fuga		Batimetría de sonar de escaneo lateral	Batimetría de lecho marino multihaz	Detección corriente de burbujas		
	Tasa de fuga	Bajo (100 g/d)					
		Medio (100 kg/d)				Depende del caso	
		Alto (100 t/d)					
	Tipo de fuga	Difusa	Depende del caso	Depende del caso		Depende del caso	
		Puntos dispersos					
		Fuga localizada	Depende del caso	Depende del caso			

Monitorización atmosférica	Método de monitorización		Trayecto largo y abierto (Láseres diodo IP)	Trayecto corto abierto (Láseres diodo IR)	Trayecto corto y cerrado (NDRIs e IR)	Covarianza de Eddy
	Cuantificación de fuga					
	Tasa de fuga	Bajo (100 g/d)				
		Medio (100 kg/d)	Depende del caso			
		Alto (100 t/d)				
	Tipo de fuga	Difusa	Depende del caso	Depende del contraste con los valores de fondo	Depende del caso	
		Puntos dispersos				
		Fuga localizada				

Monitorización superficial de sub-superficie	Método de monitorización		Flujo y gas del suelo	Química de fluido	Métodos hidroquímicos	Marcadores	Geoquímica del suelo
	Cuantificación de fuga						
	Tasa de fuga	Bajo (100 g/d)	Dependiente del tamaño de la fumarola y los niveles de fondo		Descargas localizadas de reservas fracturadas solamente		
		Medio (100 kg/d)					
		Alto (100 t/d)					
	Tipo de fuga	Difusa	Dependiente del contraste de anomalía/niveles de fondo de la fuga		Tasas de fuga bajas puede que no sean detectables		
		Puntos dispersos					
		Fuga localizada		Requiere de grandes flujos y anomalías geoquímicas extensas			

Monitorización de ecosistemas	Método de monitorización		Ecosistemas terrestres	Ecosistemas marinos	Teledetección	Método de monitorización		Imágenes espectrales satelitales y aéreas	EM aéreo
	Cuantificación de fuga					Cuantificación de fuga			
	Tasa de fuga	Bajo (100 g/d)				Tasa de fuga	Bajo (100 g/d)		
		Medio (100 kg/d)	Depende del caso	Depende del caso			Medio (100 kg/d)		Depende del caso
		Alto (100 t/d)					Alto (100 t/d)		
	Tipo de fuga	Difusa	Depende del caso	Depende del caso		Tipo de fuga	Difusa		Depende del caso
		Puntos dispersos					Puntos dispersos		
		Fuga localizada	Depende del caso	Depende del caso			Fuga localizada		Depende del caso

CAPÍTULO 3. FUNDAMENTOS DE LA TELEDETECCIÓN PARA LA IDENTIFICACIÓN DE EMISIONES DE CO₂.

El ser humano, desde tiempos inmemorables, ha necesitado obtener información sobre el entorno que le rodea para su supervivencia. Esta necesidad se ha ido incrementando con el tiempo. Los avances científicos han permitido el desarrollo de tecnologías de captura y adquisición de información a distancia con vistas a mejorar la información del entorno que nos rodea. Entre estas tecnologías se encuentra la teledetección. Según K. McCloy (2006), la teledetección se define como “la adquisición de datos usando un dispositivo de detección localizado remotamente y generar información a partir de esos datos”. Esta tecnología se basa en la extracción de datos del medio físico a distancia, para posteriormente procesarlos y analizarlos, para generar información, y poder extraer conclusiones sobre un fenómeno natural y/o humano.

El primer registro documentado de la aplicación de la teledetección data de mediados del siglo XIX cuando el francés Gaspard Félix Tournachon en 1858, realizó las primeras fotografías en blanco y negro desde globos aerostáticos sobre una localidad cercana de Paris (Sobrino, J., 2000). Desde la utilización de fotografías obtenidas desde el aire, la teledetección ha evolucionado notablemente hasta utilizar imágenes digitales obtenidas desde el espacio y con cobertura global. Los avances en ciencias puras y experimentales como la matemática, física, óptica, e informática han permitido el desarrollo rápido de la teledetección. Esta disciplina es aplicable a muchas áreas de estudios, entre las que destacan las operaciones militares o la gestión de los recursos naturales y el territorio (gestión de aguas, bosques, agricultura, suelos, la conservación del medio ambiente, urbanismo, meteorología) (Chuvieco, E., 2015).

Una de las primeras misiones de teledetección para estudios de la Tierra desde el espacio ha sido Landsat, desarrollada por el U.S. Geological Survey (USGS) y la National Aeronautics and Space Administration (NASA) de los Estados Unidos. La misión se inició en el año 1972 con el lanzamiento del satélite Landsat 1, y progresivamente se ha ejecutado por medio de otras misiones realizadas a lo largo de los años. La misión más reciente es el Landsat 8, cuyo satélite fue lanzado en 2013 (US Geological Survey, s.f.).

Esta misión es un referente en los estudios de la Tierra para muchas disciplinas ya que ofrece una cobertura global desde hace 30 años. La información adquirida por esta misión ha permitido estudiar los cambios que han ocurrido en la superficie terrestre y en algunos recursos naturales. En Europa, la Agencia Espacial Europea (ESA, siglas en inglés) ha ejecutado varias misiones, desde su fundación en 1975, para los estudios del espacio exterior, las telecomunicaciones y observaciones de la tierra. Entre ellos caben destacar las misiones de la serie Meteosat dedicadas a realizar predicciones meteorológicas, así como para proveer datos para investigaciones en el campo de la meteorología. Esta operación está operativa desde 1977. Otra misión es la Envisat, iniciada en 2002 y cuyas operaciones finalizaron en 2012. Esta misión se caracterizó por tener al menos 10 instrumentos para monitorizar la superficie terrestre y oceánica, los hielo y la atmósfera terrestre (ESA, s.f.).

3.1. Características de los sensores remotos.

En la actualidad existen diversos sensores remotos de energía electromagnética que generalmente se clasifican de acuerdo a criterios de funcionamiento, modo de transporte, resolución espectral, espacial, temporal. Estos sensores se pueden clasificar de diferentes formas:

- *Sensores activos o pasivos*: los sensores activos son aquellos que emiten su propia fuente de energía hacia la cobertura terrestre y luego reciben la energía reflejada. Ejemplos de sensores activos son el LIDAR y el RADAR. Los sensores pasivos utilizan una fuente de energía externa (luz solar) registrando la energía reflejada por la superficie estudiada. Los sensores ópticos son ejemplos de sensores pasivos.
- *Sensores espaciales o aeroportados*: los sensores también se pueden clasificar de acuerdo a la plataforma que los transporta. Los sensores espaciales son transportados a bordo de un satélite en órbita sobre la Tierra y los aeroportados a bordo de aeronaves (aviones, globos aerostáticos, drones, entre otros).
- *Sensores multiespectrales o hiperspectrales*: los sensores remotos se diseñan para obtener datos sobre regiones específicas del espectro electromagnético

(EEM), ver figura 6, de acuerdo a las necesidades de los estudios que emplearán dichos datos. En el caso de los sensores multiespectrales el número de bandas es reducido (menos de 10), por lo que el ancho de cada banda abarca varios micrómetros, mientras que los sensores hiperespectrales poseen un gran número de bandas (más de 20 y pueden llegar a tener varias decenas), por lo que el ancho de cada banda abarca el orden de nanómetros. Por lo tanto, los sensores hiperespectrales tienen una mayor resolución espectral que los sensores multiespectrales.

Aparte de estas clasificaciones, los sensores presentan otras características:

- La diferenciación de la energía (radiancia espectral) capturada por los sensores, se conoce como la resolución radiométrica. Esta resolución se define como los niveles de clasificación de la radiancia espectral que puede adquirir el sensor, de acuerdo a los niveles digitales (ND) o escala de grises que posea.
- Las imágenes obtenidas por teledetección se conforman por celdas o píxeles que, dependiendo de la configuración y altura del sensor, pueden tener tamaños variados. A la capacidad de distinguir objetos de un determinado tamaño se denomina resolución espacial. El tamaño de cada píxel puede oscilar desde centímetros hasta cientos de metros, y esto permite identificar en mayor o menor medida elementos presentes en la superficie con distintos niveles de detalle.
- Algunos sistemas constituidos por varios satélites, denominados constelaciones (e.i. programa Landsat), son capaces de captar datos del mismo punto de la superficie terrestre con una frecuencia establecida desde un par de horas a varios días, que facilita las tareas de detección de cambios, al permitir la comparación en varios tiempos. Esta característica se denomina resolución temporal.

Los datos obtenidos por los sensores remotos pueden ser de diferentes tipos de acuerdo a las informaciones que se pretendan generar. Normalmente estos datos vienen organizados en matrices de celdas o píxeles que conforman una imagen digital. El volumen de datos a procesar debe ser estimado y planificado adecuadamente, teniendo en cuenta la capacidad de procesamiento (recursos informáticos y humanos) para los

mismos. La selección adecuada de datos tiene que considerar, según Sobrino, J. (2000) y Chuvieco, E. (2015) los siguientes aspectos:

- *Resolución espacial*: el tamaño de cada píxel representa la unidad mínima de superficie que registra un sensor remoto. A igual tamaño de la imagen, el tamaño elegido de píxel es función de la extensión del área de donde se obtendrán datos, es decir, a mayor extensión territorial, menor resolución espacial, y viceversa. En algunos estudios es necesario elaborar un mosaico de imágenes, que es una agrupación de varias imágenes colindantes. Al unirse en las zonas de concordancia, en su conjunto, mantiene una elevada resolución espacial y abarca más territorio.
- *Resolución radiométrica*: la cantidad de datos que pueda almacenar cada píxel en bits. La profundidad en la resolución radiométrica que puede asignarse a un píxel permite la fragmentación de la intensidad de energía detectada por el sensor y por tanto aumentar la precisión en las medidas.
- *Resolución espectral*: la cantidad de bandas espectrales que tiene un sensor remoto, determina si este se clasifica como multiespectral (3 -10 bandas) o hiperespectral (40 o más bandas). El número de bandas incide en la “anchura” de cada banda, determinando la capacidad discriminatoria de la energía del EEM. Un mayor número de bandas en una misma región del EEM permite diferenciar los datos y, por consiguiente, generar información más detallada.
- *Resolución temporal*: la frecuencia de adquisición de datos una misma área ofrece la posibilidad de detectar cambios en una misma zona a lo largo del tiempo. Es interesante para aquellas actividades que requieran estudiar la evolución temporal de algún aspecto en concreto.

La teledetección ha sido muy utilizada en estudios medioambientales, ya que ofrece datos de las propiedades de los distintos elementos presentes en la superficie terrestre, a diferentes escalas, en distintos instantes del tiempo y asociados a una componente geográfica. Además, tiene la ventaja de que se pueden obtener resultados en poco tiempo y abarcar grandes extensiones de superficie (dependiendo de la actividad a realizar).

Figura 6. Diagrama de las regiones del espectro electromagnético.

Por esta razón, los datos adquiridos por técnicas de teledetección requieren de un tratamiento exhaustivo. Estos datos deben calibrarse, mediante procedimientos específicos, para que puedan representar la verdad terreno lo más acertado posible. Igualmente, resulta muy importante elegir adecuadamente las características óptimas de captura, para que haya una buena relación entre los costes y los requerimientos del trabajo o investigación. El supuesto ideal sería disponer de sensores con elevadas resoluciones en todos los aspectos, sin embargo esto no es siempre posible ni factible. La mejora de cualquier resolución implica una mayor cantidad de datos a adquirir, almacenar y transmitir (memoria), que en consecuencia se traduce en un aumento de costos económicos y humanos. (Sobrino, J., 2000).

Hoy en día, el fácil acceso a ordenadores con conexión a internet ha permitido la disponibilidad inmediata y hasta gratuita de información básica generada a partir de datos de teledetección (principalmente imágenes de baja o media resolución), tales como: mapas de vías de comunicación, ubicación de sitios de interés (museos, parques, comercios, oficinas gubernamentales, servicios públicos, y otros), pronósticos climatológicos. Esta información a su vez sirve como datos de entradas, junto a información en tiempo real (facilitado por las conexiones a internet y móviles), para otras aplicaciones tales como: estado del tráfico en carreteras y autopistas, cálculo de distancias y tiempo entre dos puntos, comercio electrónico zonificado, y otras.

3.2. Imágenes hiperespectrales.

Los sensores hiperespectrales son dispositivos basados en la espectrometría de imágenes que generan imágenes de alta resolución espectral de cualquier material o cobertura en el terreno. Cada píxel de la imagen está constituida por los datos de la energía recibida por el sensor en muchas bandas espectrales contiguas, de un grosor entre 1 -15 nm, y que juntas conforman la firma espectral de un elemento en zonas de interés del EEM. En teoría las bandas tienen un grosor igual, sin embargo en la práctica muchas veces no se logra este cometido debido a las diferencias de sensibilidad en los detectores, el tipo de detector para algunas longitudes de onda, o las diferencias en los niveles de energía a recibir a distintas longitudes de onda (Chuvieco, E., 2015).

El resultado es la obtención de valores de reflectancia de los objetos sobre los que se ha adquirido la imagen. Los datos obtenidos por estos sensores tienen muchas aplicaciones entre las que se encuentran: la comparación de espectros con otros conocidos o generados en laboratorio, la corrección atmosférica por las propiedades de absorción del agua, la construcción de índices de vegetación y el análisis de “end member”¹ y mezclas espectrales. Igualmente cabe mencionar que las imágenes hiperespectrales tienen como desventaja ser más voluminosas y su tratamiento resulta más complejo que el de las imágenes multiespectrales (McCloy, 2006).

3.3. Firmas espectrales.

Una firma espectral puede definirse como la “huella dactilar” de un material según la relación de radiaciones reflejadas y absorbidas, detectadas por un sensor espectral. Las interacciones entre la radiación electromagnética y un material cualquiera de la superficie terrestre, con propiedades particulares, genera una respuesta única de reflectividad en diferentes zonas del EEM (Sobrino, J., 2000).

En general, las firmas espectrales se aplican en estudios de clasificación de la superficie terrestre y la identificación de materiales. La clasificación de imágenes consiste en

¹ Análisis que determina la cobertura de un píxel según la proporción presente en una cobertura basado en la respuesta espectral. También puede evaluar las diferentes respuestas espectrales dentro de una misma cobertura, que pueden estar relacionadas a algún fenómeno de la cobertura (McCloy, 2006).

diferenciar y catalogar cada píxel, según cierta característica espectral (Chuvieco, E., 2015). Por lo tanto a mayor resolución espectral de un sensor, aumentan la capacidad de discriminar, ya que la firma espectral de los materiales sería más específica. Por ejemplo, un sensor multispectral puede diferenciar vegetación baja (montes) de vegetación alta (bosques), mientras que los sensores hiperspectrales pueden distinguir, aparte de la vegetación alta o baja, distintas especies presentes en dichas vegetaciones.

En la figura 7 se pueden observar las firmas espectrales de diversos materiales. Como la resolución espectral es muy alta, en las firmas se pueden apreciar pequeños valles y picos asociados a características propias de cada material. La situación que se describe anteriormente se debe a que el sensor es hiperspectral.

Figura 7. Firmas espectrales obtenidas con espectrorradiómetro de campo (resolución espectral =1nm).

Las respuestas espectrales de los sensores remotos se diseñan dependiendo del grado de diferenciación de información requerida, por tanto, el nivel de discriminación de componentes de la superficie terrestre estará determinado por la cantidad de bandas espectrales que posea el sensor en determinadas zonas del EEM (ver figura 8). Esta propiedad permite clasificar a los sensores en multispectrales e hiperspectrales, tal como se menciona anteriormente.

Figura 8. Diagrama de ejemplo sobre la resolución espectral respecto a Landsat 7 ETM+.

La veracidad de los datos de sensores remotos mejora con el tratamiento de los datos. La calibración de las firmas espectrales se realiza con información de las propiedades espectrales de los materiales a estudiar (ej. vegetación o minerales), que provienen de datos obtenidos en campo, empleando equipos como el espectrorradiómetro de campo, o de bases de datos conocidas como librerías espectrales (firmas espectrales obtenidas en estudios de laboratorio).

3.4. Distorsiones radiométricas y la corrección radiométrica.

Las distorsiones se producen cuando hay una variación anómala del ND de uno o varios píxeles. Las causas tienen múltiples orígenes, siendo las principales: las fallas del sensor, los cambios en la iluminación y posición del sol (según la fecha y hora de adquisición), los efectos de la atmósfera y el relieve. Estos efectos sobre la imagen digital se manifiestan de diversas formas como se aprecia en la tabla 3.

Tabla 3. Relación de causas y consecuencias de las distorsiones en las imágenes digitales obtenidas por sensores remotos ópticos.

Origen	Causas en el valor del píxel	Efecto en la imagen
Sensor		Rayado de líneas
	Ausencia de datos parcial o entera de una o varias líneas en la matriz de la imagen digital.	Caída de líneas
	Ausencia o valor máximo en puntos aleatorios de la imagen.	Ruido
Posición del sol	Disminución	Sombras ocasionada por el relieve u objetos sobre parte de la cobertura terrestre.
Atmósfera	Aumento en la zona visible e infrarroja del EEM.	Obstrucción de la visibilidad por las nubes que cubren parte de la superficie.
	Aumento del valor medio para algunos tipos de coberturas en zonas determinadas del EEM	Difuminado por algunas nubes que reducen el contraste entre tipos de coberturas
Relieve	Disminución	Sombras

Los datos adquiridos requieren un proceso de tratamiento para transformar los valores digitales en valores de magnitudes físicas medibles tales como la radiancia y la reflectancia. Existen factores inherentes al funcionamiento de los sensores, que afectan y crean distorsiones en las imágenes. También hay factores externos que influyen en la imagen final, entre los más destacados, están la forma geométrica de la superficie terrestre, la atmósfera y el relieve. Todos aumentan o disminuyen la cantidad de energía percibida por los sensores remotos, y por tanto, pueden producir una lectura errónea de la superficie terrestre. Este sesgo debe ser eliminado para obtener datos cercanos a la “verdad” en el terreno. Cabe destacar que las mediciones en campo constituyen una herramienta muy útil para calibrar las imágenes remotas (McCloy, K. R., 2006).

Según las necesidades del estudio y la precisión requerida para las imágenes espectrales, las correcciones radiométricas se pueden realizar en distintos grados de complejidad y no es necesario aplicarlas todas. Algunas correcciones radiométricas se realizan con operaciones aritméticas simples. No obstante, las distorsiones asociadas a la atmósfera y la topografía están entre las más complejas. La mayoría de programas de tratamiento de imágenes espectrales ofrecen módulos y herramientas para ejecutar las correcciones necesarias. A continuación se mencionan los efectos y correcciones más comunes.

3.4.1. Efectos geométricos y la corrección geométrica.

La curvatura de la tierra y la posición del sol (según la fecha y hora del momento de adquisición) ocasionan distorsiones en las imágenes espectrales. Los sensores remotos reciben la energía electromagnética reflejada de la superficie terrestre, pero esta no llega de forma perpendicular en toda la escena. Las partes más externas de una imagen son las que más deformaciones tienen, por lo que se tiene que ajustar la imagen a la realidad terreno para que puedan representarse fielmente en un plano (Sobrino, J., 2000).

La corrección geométrica consiste en asignar a las imágenes digitales una posición en el espacio, es decir, que a cada píxel se le otorga una ubicación dentro de un sistema de

coordenadas específico. Este proceso se realiza usando puntos con coordenadas conocidas en el espacio real.

3.4.2. Efectos atmosféricos y la corrección atmosférica.

La mezcla de gases de la atmósfera posee propiedades que tienen un comportamiento particular en distintas zonas del EEM. La composición química, estructura, concentración y localización, de estos gases influyen en la capacidad de la atmósfera para absorber y dispersar las ondas electromagnéticas. Esta propiedad de la atmósfera se define como transmitancia. En ciertas longitudes de ondas la energía electromagnéticas (especialmente en las regiones ultravioleta, visible e infrarrojo) pueden atravesar la mezcla de gases, mientras que en otras pueden quedar retenidas al interactuar con esta.

Este fenómeno se describe en la ecuación de transferencia radiativa, cuyo principio se basa en las interacciones entre la radiación solar y el sistema superficie/atmósfera. La figura 9 derecha explica la contribución de radiancia (L_s) que llega al sensor. La ruta L_o se atribuye a luz que nunca encuentra la superficie, pero es dispersada y absorbida dentro de la atmósfera, la L_o describe la trayectoria directa de transmitancia sol – superficie – sensor, mientras que la ruta L_d se atribuye a la transmitancia difusa y ocasiona el “efecto de adyacencia”, una mezcla espacial inducida por la dispersión atmosférica (Bernstein, L. et al., 2005). Los componentes más influyentes de este efecto son el vapor de agua (H_2O), oxígeno (O y O_2), ozono (O_3), CO_2 , el metano (CH_4), partículas en suspensión, aerosoles (ESA, s. f.).

La corrección atmosférica es un proceso de ajuste o compensación aplicada en las imágenes multiespectrales e hiperespectrales, ya que las radiaciones recibidas por los sensores incluyen datos sobre la atmósfera. El objetivo consiste en remover los efectos de absorción y esparcimiento atmosférico, descritos anteriormente, y para ello se necesitan datos sobre algunas propiedades atmosféricas como la concentración de vapor de agua, aerosoles y la visibilidad de la escena, que raramente tienen mediciones directas en el momento de adquisición de las imágenes (Bernstein, L. et al., 2005). En la figura 9 izquierda, se aprecia como la firma espectral de una planta observada por el

sensor (línea continua) presenta valles de baja reflectancia debido a los efectos de la atmósfera. Una vez aplicada una corrección atmosférica se obtendría la firma espectral solo de la hoja (línea discontinua).

Figura 9. (izq.) Cálculo en MODTRAN de la reflectancia aparente de un píxel de vegetación observado desde el espacio con una vista nadir, bajo un modelo atmosférico de verano en latitud media y aerosoles rurales con una visibilidad =23km (Bernstein, L., et al., 2005). (der.) Contribuciones de la transferencia de radiación a la radiancia observada en el sensor, L_s .

Existen varios métodos y algoritmos que realizan esta corrección utilizando los datos de las imágenes para inferir información atmosférica. Los procedimientos habituales de corrección atmosférica se agrupan según los datos requeridos, de los cuales destacan los siguientes:

- Aquellos que utilizan mediciones de parámetros atmosféricos, que requieren datos locales del momento de adquisición de la imagen,
- los que emplean datos obtenidos a partir de imágenes de otros sensores, especialmente de sensores hiperspectrales.
- derivar datos simulados mediante modelos físicos de transferencia radiativa, como el modelo Modtran,
- y por último, los métodos que utilizan la información obtenida de la propia imagen. Este método es el menos fiable pero el más sencillo.

Un ejemplo de estos métodos que utilizando la información de la imagen, conocido como el método mínimo del histograma. El método del píxel oscuro, propuesto por Chávez, P. (1988), fue uno de los primeros métodos de corrección atmosférica planteados. Se basa en eliminar la contribución de radiancia dispersada por la

atmósfera, mediante la identificación de píxeles oscuros. Estos píxeles corresponden a aquellas coberturas terrestres que no deberían reflejar energía electromagnética, tales como las sombras debidas a la topografía o las nubes, o superficies de agua limpia con suficiente profundidad. En teoría el sensor no debería recibir lectura de ND en esas zonas, sin embargo se detectan radiaciones mínimas para esas coberturas. Se asume que dichos valores provienen de la contribución atmosférica. Esto se traduce en que los valores de los píxeles oscuros se sustraen al resto de píxeles, obteniendo así el valor correspondiente a la cobertura terrestre en cada de longitud de onda.

3.4.3. Efectos topográficos y la corrección topográfica.

En áreas donde la topografía es irregular, con presencia de valles, montañas, acantilados, entre otras formas del relieve, es prudente minimizar la distorsión radiométrica conocida como efecto topográfico. Este es producto de las diferencias de iluminación debido al ángulo de incidencia de los rayos solares con el terreno, que genera una variación en la energía recibida por el sensor en el momento de la adquisición de las imágenes.

Una forma de reducir el efecto topográfico es aplicar transformaciones basadas en los modelos de reflectancia Lambertiano y no Lambertiano. Los modelos se basan en una normalización de la imagen tal como si fuese una superficie plana. El modelo de reflectancia Lambertiano asume que la superficie refleja la energía solar incidente uniformemente en todas las direcciones y que las variaciones en la reflectancia se deben a la cantidad de radiación incidente. Los valores normalizados de brillo se obtienen por (Colby, J.D., 1991; Smith, J. A., 1980):

$$BV \text{ normal } \lambda = BV \text{ observado } \lambda / \cos i$$

Donde:

- *BV normal* λ es el valor de brillo normalizado,
- *BV observado* λ es el brillo observado, y
- *cos i* es el coseno del ángulo de incidencia.

El ángulo de incidencia viene dado por:

$$\cos i = \cos (90 - \vartheta_s) \cos \vartheta_n + \sin (90 - \vartheta_s) \sin \vartheta_n \cos (\varphi_s - \varphi_n)$$

Donde:

- i equivale al ángulo entre los rayos solares y la normal de la superficie,
- ϑ_s es la elevación del sol,
- φ_s es el azimut del sol,
- ϑ_n es la pendiente de cada elemento de superficie y
- φ_n es la dirección de pendiente de cada elemento de superficie.

Si la superficie tiene pendiente de 0 grados, entonces la dirección es indefinida e i es simplemente $90 - \vartheta_s$.

3.5. Teledetección aplicada al estudio de fugas de CO₂.

La detección de indicios asociados a las fugas de CO₂ puede enfocarse bajo dos grandes directrices. La primera considera la detección directa de este compuesto, mientras que la segunda se basa en la identificación de afecciones a la vegetación o al suelo de la zona (detección indirecta) (IEAGHG, 2012).

Existen proyectos de la monitorización del CO₂ por medio de sensores específicos transportados en satélites. Un ejemplo es el sensor SCanning Imaging Absorption spectroMeter for Atmospheric CHartography (SCIAMACHY) instalado a bordo de la plataforma ENVISAT de la Agencia Espacial Europea. Inició sus operaciones en marzo de 2002, considerando una vida útil prevista de 5 años, pero que pudo ser extendida hasta abril de 2012. Este equipo evaluó las concentraciones atmosféricas de gases relevantes, entre ellos el CO₂, apoyándose en la firma espectral de cada gas y sus características más relevantes, a una escala global. En el caso del CO₂, utilizó los picos de absorción en la región espectral del infrarrojo, en las proximidades de las 1,7 micras. El sensor estaba diseñado para detectar variaciones de concentración en las capas superiores de la atmósfera, desde la troposfera hasta la mesosfera (ver la figura 10). Las mediciones aportaron datos para estudios relacionados con los balances de CO₂ globales, cambio climático, entre otros. (Buchwitz, M., et al., 2005).

Según Lichtenhaler (1996) el estrés en la plantas ocurre cuando las condiciones medioambientales no son adecuadas para el crecimiento óptimo de estas. Algunas de estas condiciones son la sequía, temperaturas extremas, infestaciones, enfermedades bacterianas o virales, deficiencia de nutrientes, anegación de agua, agotamiento de oxígeno, o suelo acidificado. Es conocido que niveles ligeramente más altos que los existentes en la atmósfera producen un efecto positivo en la vegetación al que se denomina fertilización carbónica, pero un exceso de CO₂ causa un efecto negativo en las plantas. Sin embargo no se ha determinado exactamente que mecanismo se ve afectado por este exceso. Se asume que este gas desplaza el oxígeno de las raíces de la planta, lo cual ocurre en fugas naturales de CO₂. La vegetación sometida a estrés por largos periodos de tiempo puede presentar crecimiento atrofiado, contenido de humedad reducido, o un descenso en el contenido de clorofila en las hojas (Taiz, L., Zeiger, E., 2006; Male, E. J., et al. 2010; Rouse, J. H., et al. 2010).

Figura 10. CO₂ atmosférico medido por SCIAMACHY sobre el hemisferio norte en el año 2003. Los valores bajos (azul) en julio/agosto, respecto a valores más altos (verde y amarillo), se deben a la fijación de CO₂ por la vegetación (bosques boreales), que están en su fase de crecimiento durante los meses de verano.

Fuente: M. Buchwitz, 2005.

Las firmas hiperspectrales de la vegetación son capaces de señalar el estrés presente en las plantas, sin embargo no las causas de este estrés. Esta incertidumbre es problemática cuando se quiere detectar fugas de CO₂. Por ejemplo, la vegetación sobre

un emplazamiento de almacenamiento puede estar afectada negativamente, no obstante dicho estrés no tiene que estar asociada necesariamente a una fuga de CO₂.

Por esto resulta importante realizar estudios de línea de base en la zona de un futuro emplazamiento para evaluar las fluctuaciones naturales de CO₂ en el suelo y el aire cercano a la superficie con el fin de evitar falsos positivos. Estas variaciones pueden ser a causa de la actividad biótica del suelo, variaciones estacionales o por escapes a través de fracturas o fallas. Aunado a estos factores, otros como la distribución espacial de las plantas estresadas o la presencia/ausencia de algunas especies vegetales podrían ofrecer más datos sobre posibles rutas de fuga de CO₂ hacia la superficie (Male, E., et al., 2010).

Las investigaciones sobre técnicas de monitorización se han evaluado mediante experimentos o el estudio de análogos naturales, que simulen o se asemejen a las condiciones que tendrían unas fugas de CO₂ en un emplazamiento de almacenamiento geológico. En los últimos años se han evaluado técnicas de teledetección aérea en análogos naturales para observar si las fumarolas podrían ser detectadas indirectamente a través de respuestas de la vegetación y alteraciones del suelo o minerales.

No obstante algunos autores, Male, E., et al. (2010) y Bateson, L., et al. (2008), indican que en algunos experimentos realizados en un ambiente controlado, normalmente no se aprecian las adaptaciones a las que el suelo y los componentes bióticos son sometidas. La exposición prolongada al CO₂ no significa que se produzcan daños a estos elementos. Al contrario, en el caso de la vegetación, más bien podría verse beneficiada por una fertilización carbónica. Por lo tanto, resulta conveniente realizar el estudio de técnicas de monitorización de CO₂ en análogos naturales, ya que se asemejan al escenario de una fuga de este gas.

En este orden de ideas, Bellante G. et al. (2013), han diseñado un experimento en el Centro de Investigación y Tecnología de Cero Emisiones (por sus siglas en inglés, ZERT) ubicado en Bozeman Montana, EE.UU., donde han instalado una tubería enterrada que liberara caudales de CO₂ para simular una fuga de este gas durante 3 semanas. Sobre la zona se han obtenido imágenes hiperespectrales aéreas en la región visible e infrarrojo del EEM. Los datos de la serie temporal de las imágenes se han analizado a través del

Red Edge Index (REI). Este índice resulta del cociente entre una banda del infrarrojo cercano y otra del rojo visible. Entre los resultados obtenidos destaca la capacidad de detectar el estrés acumulado en las plantas asociados a las fugas de CO₂, medido con el REI. A pesar de que este método identifica zonas de estrés vegetal, el estudio ha destacado que las variaciones naturales y estacionales del entorno tienen que ser estimadas antes de realizar comparaciones. También pone en evidencia de que existe la posibilidad de que el estrés pueda originarse en otras causas, y plantea la posibilidad de investigar si los datos hiperespectrales son capaces de discriminar entre el estrés en las plantas de distintas especies.

El ZERT se ha centrado en las ciencias básicas del CAC y en el desarrollo de tecnologías que puedan asegurar la seguridad y fiabilidad de dicho almacenamiento (Riding, J., 2005). Uno de los objetivos del centro es establecer técnicas de medición para verificar el almacenamiento e investigar fugas. En una zona del ZERT, Rouse et al. (2010) han instalado un sistema de sensores multiespectrales para adquirir imágenes verdes, rojas y de infrarrojo cercano. El experimento tiene la particularidad de que realiza una calibración de la reflectancia en tiempo real desde una plataforma de 3m de altura, observando la vegetación cercana expuesta a liberaciones poco profundas de CO₂ en el suelo. Durante las pruebas se liberó un caudal de 100 kg d⁻¹ en el verano de 2007 y de 300 kg d⁻¹ en 2008. Los análisis de regresión de la reflectancia de bandas y el Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) mostraron una correlación significativa con la distancia desde el punto de emanación de CO₂, indicando la viabilidad de este método para monitorear fugas de este gas.

Tomando como premisa que las altas concentraciones de CO₂ en el suelo pueden estresar a la vegetación que no esté adaptada a esas condiciones y que, posteriormente, pueden causar cambios en la firma espectral de la vegetación en el EEM, Male E. et al. (2010) inyectaron CO₂ puro en el subsuelo durante 29 días a un caudal de 300 Kg día⁻¹. Utilizaron la infraestructura del experimento ubicado en ZERT, conformado principalmente por una tubería horizontal a 2m de profundidad. El objetivo fue medir las firmas espectrales en plantas sin podar, y por consiguiente, detectar la cantidad de estrés que se asume es causado por un exceso de CO₂ en el suelo. En este experimento lograron identificar cambios en la firma espectral de las plantas, al utilizar dos sensores

distintos. Los resultados fueron similares en áreas cercanas a la zona de inyección. Estos resultados también fueron comparados con mediciones de concentración de CO₂ en el suelo, el cual indicaba que el límite inferior de este gas para estresar a la vegetación está entre 4% y 8% en volumen.

Las investigaciones realizadas por Bateson et al. (2008) sobre la detección de CO₂ proveniente del subsuelo a través de indicios indirectos (estrés de la vegetación), obtenidos por técnicas de teledetección, se asemejan a las anteriores. La diferencia radica en que la zona de estudio fue un análogo natural. Esta zona es una caldera volcánica colapsada cercana a la localidad de Latera, en Italia central, y se caracteriza por presentar emanaciones de CO₂ y ocasionalmente H₂S a la superficie a través de unas fumarolas ya conocidas e identificadas. Las técnicas hiperespectrales detectaron el estrés sobre las plantas y, en algunos casos, dicha alteración fue atribuible a emanaciones de gases, ya que pudo ser verificada al detectar gases por técnicas de geoquímicas de superficie. Sin embargo en algunos casos, los investigadores no lograron determinar si la causa del estrés era causado por el CO₂ o por el H₂S en las fumarolas más grandes. Este estudio además recomendó que, para obtener mejores resultados durante la adquisición de datos sobre el estrés vegetal, las observaciones deben realizarse cuando las plantas están con hojas.

En la misma línea que los autores anteriores, Govindan R. et al. (2010) investigaron la potencialidad que tienen las imágenes hiperespectrales aeroportadas en el análogo natural de la zona volcánica de Latera, Italia. Estos autores consideran que esta zona podría asemejarse a un escenario de fugas en una zona de almacenamiento geológico.

Su investigación se basó en analizar píxeles anómalos presentes en las imágenes hiperespectrales mediante técnicas probabilísticas de fusión de información como la teoría de evidencia Dempster-Shafer; previamente los píxeles fueron tratados utilizando una metodología de filtrado de imágenes geoestadística basado en:

- la función aleatoria intrínseca,
- el análisis de componentes principales (ACP), y
- la detección de anomalías de Reed-Xiaoli.

La información de los píxeles anómalos y los efectos indirectos por exposición al CO₂ (alteraciones de la vegetación y del suelo) permitieron obtener una medida de confianza para la identificación de posibles puntos de fuga. Entre sus principales resultados resaltó la detección de puntos de fuga de CO₂ a partir de los píxeles anómalos, que fue corroborada por mediciones directas en campo. Igualmente en estudios posteriores, Govindan et al. han evaluado el uso de imágenes multiespectrales satelitales de menor resolución para aprovechar las ventajas que ofrecen los sistemas de mayor cobertura del terreno y la disponibilidad de imágenes para construir una serie temporal.

Gutiérrez del Olmo (2015) realizó estudios de emisiones observando fugas naturales de CO₂ y utilizó imágenes multiespectrales satelitales, en Campo de Calatrava, con la finalidad de identificar indicios de fugas desconocidas. Al igual que Govindan R. et al, consideró que la zona seleccionada tiene similitudes a un escenario de fugas en un proyecto CAC. Por lo tanto, Gutiérrez del Olmo, J. elaboró índices de vegetación (IV) y reclasificaron las imágenes según los valores obtenidos en los análogos naturales desconocidos, además se apoyó en la interpretación de información auxiliar de la zona (geología).

Entre los resultados obtenidos, destacan las observaciones respecto a la relación entre la vegetación verde y las emisiones de CO₂ en zonas húmedas. Además de relación espacial entre los análogos naturales y las estructuras geológicas de la zona. Los IV fueron capaces de señalar puntos, que apoyados en una fotointerpretación de la imagen con información auxiliar, presentaron presencia de fugas de CO₂. Estos puntos se visitaron para realizar mediciones in situ de concentraciones del gas y arrojaron resultados positivos.

CAPÍTULO 4. ZONA DE ESTUDIO “CAMPO DE CALATRAVA”.

El desarrollo de los objetivos de esta investigación requiere una zona que sea considerada un análogo natural de emisiones de CO₂. El área conocida como Campo de Calatrava (Ciudad Real, España) ha sido objetivo de estudios previos relacionados con emisiones naturales de CO₂. Esta zona presenta un elevado interés como análogo natural debido a su peculiar geología y actividad volcánica.

Por estas razones, se eligió esta zona para estudiar el uso de tecnologías de teledetección en el estudio de análogos naturales de emisiones de CO₂, para lo cual se adquirieron distintas imágenes tanto aeroportadas (hiperespectrales) como tomadas desde satélites (multiespectrales). A continuación se presentan las características más representativas de la zona considerada.

Tal como se describieron en el apartado 3.5, las fugas de gas ocasionan afecciones detectables en la vegetación y en el suelo. Dado que Campo de Calatrava es una zona con una actividad volcánica conocida y estudiada, donde se han documentado localizaciones con fugas de CO₂ a través de grietas presentes en el suelo (La Sima) y emanaciones cercanas al río Jabalón conocidas como hervideros, cabe esperar que dichas afecciones en la vegetación y el suelo sean detectables, utilizando tecnologías basadas en sensores remotos. Este es el motivo por el que se ha seleccionado esta zona.

4.1. Ubicación.

El Campo de Calatrava se localiza en la provincia de Ciudad Real, España (38°49'N, 3°46'W, ver figura 11), entre los Montes de Toledo al norte y Sierra Morena al sur, y tiene una extensión total de unos 5.000 km². La zona de estudio se enmarca dentro de un cuadrilátero de aproximadamente 10 km de lado, elevado unos 500 msnm. Esta zona representa la prolongación de la penillanura extremeña en tierras castellanas.

La zona abarca 25 municipios de la provincia de Ciudad Real (ver tabla 5), que por sus características peculiares, conforman la comarca denominada Campo de Calatrava. Algunas de las principales localidades que quedan incluidas dentro del área son: Ciudad Real, Almagro, Daimiel y Bolaños de Calatrava. A primera vista se puede apreciar que la

zona se caracteriza por el predominio de las actividades agrícolas y por un elevado número de modificaciones antrópicas en el entorno natural.

Figura 11. Ubicación del Campo de Calatrava en el territorio peninsular de España. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Instituto Geográfico Nacional.

Desde el punto de vista geológico, su rasgo más distintivo lo constituyen las coladas eruptivas volcánicas, cuya génesis está ligada a los ajustes isostáticos que tuvieron lugar, tras el Pontiense, como compensación a la orogenia Alpina. La actividad se desarrolló entre hace 1,75 y 8,7 millones de años, durante el Plioceno y el Cuaternario (Higueras, P., 1997). Este periodo se considera una actividad bastante reciente en tiempo geológico; por tanto, los edificios volcánicos conservan en buena parte su morfología original (Ancochea, E., 1988; Vera, J. A., 2004).

La región volcánica tiene su centro geográfico cerca de la confluencia de los ríos Jabalón y Guadiana, extendiéndose las estructuras volcánicas en un área de 50 kilómetros de radio desde este punto (JC-CLM, 2013). En conjunto, existen numerosos asomos volcánicos que constituyen roquedos localmente denominados “castillejos” o “negrizales”, aparte de unos sesenta conos volcánicos, de tipos vulcaniano y estromboliano, de escaso tamaño, pero lo suficiente para proporcionar características morfológicas singulares a la zona. En uno de ellos, denominado de Fuentillejo, se encuentra ubicada la única laguna en cono volcánico de la península Ibérica (JC-CLM, 2013).

La actividad eruptiva ha sido intensa a lo largo de las etapas geológicas en Campo de Calatrava, en el siguiente apartado se explicará con más detalle. En esta zona se sitúan

las pocas anomalías térmicas superficiales documentadas en la región volcánica. También la presencia de gases magmáticos en el subsuelo ha dado lugar a la emisión de cantidades excepcionales de CO₂ asociadas a la perforación de sondeos para obtener agua de riego en diversas localidades del entorno, como Los Cabezos en 1987, Añavete en 2000 y El Rosario en 2001, entre otros (Higueras, P. 2013).

4.2. Características abióticas.

4.2.1. Geología y Relieve.

El área está conformada por un basamento hercínico recubierto de sedimentos del Cenozoico tardío. Este cimienta está cubierto discordantemente por sedimentos fluviales y lacustres, desde el Mioceno superior al Cuaternario, depositados dentro de cuencas sedimentarias Terciaria-Cuaternarias de hasta 200km² que están delimitadas por fallas.

Figura 12. Líneas estructurales del campo de Calatrava. Fuente: Vera, J. A., 2004

El relieve característico está formado por las sierras cuarcíticas alargadas de dirección subparalela este-oeste de altitudes modestas (alrededor de 700 y 800 m de altitud), los amplios valles de fondo plano, las superficies de erosión-depósito colgadas, los depósitos de ladera, los materiales de relleno de edad pliocena y cuaternaria relacionadas con fallas que afectan al zócalo, y las morfologías de origen volcánico (Ancochea, E., 1988; Vera, J. A., 2004). El relieve es muy suave dentro de las fosas y solo es modificado por la presencia de los edificios volcánicos, que producen morfologías

características y muy llamativas. Esto ocasiona una toponimia particular, ya que estos edificios volcánicos reciben nombres como "Negrizal de las Casas", "Cabeza Parda", "Cerro Moreno", etc. Un patrón complejo de fracturación determina las geometrías de las cuencas (Vera, J. A., 2004).

Al menos tres episodios tectónicos diferentes del Neógeno pueden ser identificados en el Campo de Calatrava. Una primare fase expansiva del Mioceno tardío, que resultó en la apertura inicial de la llamada cuenca La Mancha y una fase final de compresión débil a escala regional. Los mecanismos eruptivos responsables de estas morfologías han sido fundamentalmente de dos tipos: estromboliano e hidromagmático. No existen edificios que puedan corresponder a erupciones de tipo hawaiano, aunque sí hay coladas lávicas de cierto volumen emitidas por volcanes estrombolianos.

Figura 13. Afloramientos volcánicos en la región de Calatrava. Fuente: Vera, J. A., 2004.

El vulcanismo estromboliano originó pequeños volcanes cónicos, actualmente degradados a cerros redondeados, de formas troncocónicas a semiesféricas dependiendo del grado de erosión. Sus diámetros abarcan desde los 100 m a los 2 km, y sus alturas, desde 20 a 120 m. Solo ocasionalmente se identifican depresiones tipo cráter. De estos volcanes suelen partir coladas de lavas de diferente importancia, que pueden llevar a alcanzar los 6-7 km de longitud. Algunos de los mejores ejemplos de este tipo de volcán son los de La Yezosa, en Almagro, y Cerro Gordo, en Valenzuela de Calatrava (ver la figura 12) (Vera, J. A., 2004).

El vulcanismo hidromagmático es el más frecuente en la región. Da origen a unos edificios volcánicos muy característicos, pero a menudo difíciles de identificar como tales en el terreno. En la figura 13 se aprecia la distribución de afloramientos volcánicos en la zona. Estas depresiones elípticas se conocen como "maares", que llegan a alcanzar diámetros entre 1 a 1,5 km y rara vez superan las 60 ha de extensión siendo la media algo más de 25 ha. Estos cráteres y depresiones acumulan las aguas de escorrentía o estacionales, dependiendo en gran medida del balance anual de precipitaciones (JC-CLM, 2014). Uno de los ejemplos más típicos puede ser la Hoya del Mortero, en Poblete. Por otra parte, es relativamente frecuente que se sucedan momentos de actividad hidromagmática y estromboliana a partir del mismo centro emisor (Higueras, P., 1997).

Las rocas volcánicas emitidas por estos volcanes corresponden a basaltos, en los que se pueden diferenciar una serie de variedades, tanto composicionales: melilititas olivínicas, limburgitas, nefelinitas olivínicas, basaltos y basanitas o leucititas olivínicas; como texturales: rocas porfídicas masivas, piroclastos escoriáceos, y depósitos hidromagmáticos. Las rocas volcánicas de la región Campo de Calatrava corresponden a un magmatismo alcalino de intraplaca, generado a partir de bajas tasas de fusión parcial del manto superior. Los magmas serían líquidos primarios, como indican los altos contenidos en Ni y el alto valor de Mg ($=\text{MgO}/(\text{MgO}+\text{FeO})$). Estas características permiten establecer que el magmatismo de la región Campo de Calatrava podría estar relacionado con la existencia de un punto caliente asociado a un proceso de elevación cortical y posiblemente de "rifting" abortado (Vera, J. A., 2004).

Estas actividades geológicas otorgaron a Campo de Calatrava una serie de fumarolas dispersas, afloramientos de flujos de lava máfica y depósitos piroclásticos de composición alcalina. Muchas de estas unidades se caracterizan por las descargas de agua y gases a la superficie provenientes de acumulaciones de CO_2 debido a la desgasificación del magma atrapado cerca de la corteza terrestre (figura 14). Cabe destacar que las características isotópicas de los gases subterráneos indican una alta concentración de CO_2 (hasta un 98,5 % del volumen) y ratios de helio isotópico asociados a una fuente del manto. Campo de Calatrava junto a Selva-Empordá (Noreste de España) representan las zonas de mayor emisión de CO_2 del subsuelo en la España continental. (Higueras, P., 1997; Vera, J. A., 2004).

Figura 14. Mosaico de fotografías aéreas del Campo de Calatrava señalando los puntos de emisiones de CO₂ conocidos. Fuente: Instituto Geográfico Nacional.

Asociado a este magmatismo encontramos una serie de yacimientos minerales, de escasa importancia minera, ya que por lo general presentan escaso tonelaje, pero que constituyen un tipo único a nivel mundial. Se trata de mineralizaciones de óxidos de Fe y de Mn, las segundas con el interés añadido de que presentan contenidos relativamente elevados en Co, lo que ha hecho que hasta fecha reciente hayan sido objeto de prospección minera, con ánimo de localizar alguna masa de suficiente volumen como para permitir su explotación (Higueras, P., 1997).

Otra de las manifestaciones características del área y mucho más conocidas consisten en los manantiales de "agua agria" o "hervideros", siendo el más conocido la "Fuente Agria" de Puertollano. El nexo genético sería entre mineralizaciones y manantiales, estaría en las manifestaciones de actividad hidrotermal póstuma ligada al magmatismo. En cuanto a las mineralizaciones, se pueden establecer dos grandes tipos, las mineralizaciones proximales con respecto a focos hidrotermales, que a su vez se dividen en dos tipos: encostramientos de óxidos de Fe-Mn y capas de "canutillos" de óxidos de

Mn-(Co); y las mineralizaciones distales con respecto a los focos hidrotermales: capas con pisolitos de óxidos de Mn-(Co) (Higueras, P., 1997).

La distribución de los humedales, y por tanto de las depresiones de origen volcánico está guiada por los condicionantes estructurales y litológicos de Campo de Calatrava. En algunos casos las erupciones freáticas que han dado lugar a las depresiones se relacionan con sistemas hidrotermales o con la intrusión de diques, lo que da lugar al agrupamiento de humedales. Las lagunas muestran una disposición alineada sobre fracturas asociadas a sistemas geotermiales o relacionadas con mecanismos eruptivos. La explosividad del proceso eruptivo fue baja, pero la presencia de agua ajena al proceso volcánico dio lugar a eventos de alta explosividad y a la presencia de cráteres de explosión en los cuales se albergan numerosas lagunas (JC-CLM, 2013).

4.2.2. Climatología.

El clima de la región de Castilla-La Mancha resulta muy variado debido a las diferencias de altitud y de su ubicación en el centro peninsular. La altitud regional oscila entre los 320 m de Las Minas (Hellín, Albacete) y los 2272 m que alcanza el Pico del Lobo en el macizo de Ayllón (noroeste de Guadalajara). En Campo de Calatrava la altura es de alrededor 650 msnm en las zonas llanas y unas decenas de metros más en las colinas y volcanes (Hernández, E., et al. 2011).

Los incrementos en altitud no son lo suficientemente altos como para fomentar una disminución de las temperaturas y el aumento de las precipitaciones, por lo que los requisitos ecológicos para la vegetación y la fauna son homogéneos. La zona está alejada de la influencia de las masas oceánicas, lo que le imprime un marcado carácter continental con bruscas oscilaciones térmicas, a este extremo ha debido adaptarse la flora que allí habita (Hernández, E., et al. 2011).

Aunque toda la región se halla bajo la influencia de un clima típicamente mediterráneo con un mínimo estival de precipitaciones y dos máximos (primavera, otoño-invierno), las temperaturas y precipitaciones varían mucho de unas zonas a otras en la región de Castilla La Mancha. En la tabla 4 se encuentran los valores promedios de distintas

variables meteorológicas que explican el carácter mediterráneo continental del clima presente en el Campo de Calatrava (AEMET, s.f.).

Tabla 4. Valores climatológicos normales, Ciudad Real. Periodo: 1981-2010. Altitud (m): 628. Latitud: 38° 59' 21" N - Longitud: 3° 55' 13" O. Fuente: Agencia Estatal de Meteorología.

Mes	T	TM	Tm	R	H	DR	DN	DT	DF	DH	DD	I
Enero	6	10,9	1,1	35	78	5,9	1	0,1	7,3	13,3	6,7	133
Febrero	8	13,7	2,4	30	71	5,7	0,9	0,2	3,8	7,2	6,3	157
Marzo	11,4	17,9	4,9	28	61	4,7	0,2	0,4	1,4	2,2	6,8	213
Abril	13,4	19,7	7,1	48	59	7,8	0,1	1,3	0,7	0,2	4,8	226
Mayo	17,5	24,1	10,9	41	55	6,3	0	3,1	0,4	0	4,2	260
Junio	23,2	30,5	15,9	25	46	3,4	0	3,2	0	0	9,9	313
Julio	26,7	34,5	18,9	6	40	0,8	0	1,4	0	0	17,6	352
Agosto	26,1	33,7	18,6	5	43	1	0	1,7	0	0	15,1	323
Septiembre	21,6	28,4	14,8	26	54	3,6	0	1,8	0,3	0	8,8	247
Octubre	15,8	21,5	10	53	67	6,4	0	1	2	0	6,1	190
Noviembre	10,1	15,1	5,1	45	76	6,4	0	0,2	4,2	2,9	5	135
Diciembre	6,9	11,4	2,5	59	81	7,4	0,3	0,2	7,6	9,6	5,6	114
Año	15,6	21,8	9,3	402	61	59,3	2,6	14,2	27,6	35,4	97,3	2664

T	Temperatura media mensual/anual (°C)
TM	Media mensual/anual de las temperaturas máximas diarias (°C)
Tm	Media mensual/anual de las temperaturas mínimas diarias (°C)
R	Precipitación mensual/anual media (mm)
H	Humedad relativa media (%)
DR	Número medio mensual/anual de días de precipitación superior o igual a 1 mm
DN	Número medio mensual/anual de días de nieve
DT	Número medio mensual/anual de días de tormenta
DF	Número medio mensual/anual de días de niebla
DH	Número medio mensual/anual de días de helada
DD	Número medio mensual/anual de días despejados
I	Número medio mensual/anual de horas de sol

La bioclimatología analiza la distribución de plantas y comunidades vegetales en función del clima y propone clasificaciones para delimitar el ámbito climático de cada comunidad vegetal. En España las clasificaciones bioclimáticas más utilizadas han sido las propuestas por Rivas -Martínez et al. (2004). La versión más reciente considera la existencia de dos macrobioclimas en Castilla-La Mancha. El mediterráneo, dominante en la mayoría de la región, se caracteriza por una sequía estival muy marcada. El templado en su variante submediterránea, queda limitado a la Sierra de Ayllón y al Sistema Ibérico, y se caracteriza por una sequía estival atenuada.

Atendiendo a los valores de la temperatura media anual y de las medias de las máximas y de las mínimas del mes más frío, en cada uno de estos macrobioclimas se reconocen

una serie de pisos bioclimáticos, que guardan estrecha relación con los pisos altitudinales de vegetación.

Dentro del macrobioclima mediterráneo, la mayor parte de las provincias de Albacete, Toledo, Ciudad Real, mitad occidental de Cuenca y cuadrante suroccidental de Guadalajara, están ubicadas en el piso mesomediterráneo. En el piso bioclimático mesomediterráneo hay ombroclimas (clasificación según la precipitación) que van desde el semiárido (200-350 mm) hasta el subhúmedo (600-1000 mm). Cada piso bioclimático y cada tipo de ombroclima poseen una flora y vegetación propias, razón por la que la variada climatología regional también contribuye positivamente a incrementar la riqueza florística y a diversificar el paisaje vegetal.

4.3. Características bióticas.

4.3.1. Biogeografía y vegetación.

La vegetación presente en Campo de Calatrava tiene características muy variadas. El uso del suelo define la presencia entre las plantas cultivables y las silvestres. Por otra parte, el entorno geográfico, principalmente el tipo de suelo y la disponibilidad de agua, definen que especies vegetales habitan esta zona (figura 15).

Figura 15: Especies vegetales características del Campo de Calatrava.

Según la sectorización biogeográfica de la Península Ibérica (Martínez, J., et al. 2008; Rivas-Martínez, S. 1987, 2004), el Campo de Calatrava tiene características de la zona Mediterránea – Ibérica –Central, Subprovincia Castellana y Sector Manchego, tal como se muestra en la figura 16. Las condiciones geográficas condicionan la vegetación que puede ser capaz de desarrollarse en la zona. Eliminando la influencia antrópica, las series de vegetación existentes en la zona se corresponden con:

-
- Map of the Iberian Peninsula and surrounding regions, showing 25 numbered biogeographic realms. The map includes labels for major cities (Lisboa, Madrid, Algiers), the Strait of Gibraltar, and the Balearic Islands. An inset map shows the Canary Islands. The legend on the right lists the realms with their corresponding numbers and colors.
- Legend:**
- 4a. Atlantic European
 - 4.b. Cantabroatlantic, 4b. Orocantabrian, 4c. Britannic, 4d. Azorean
 - 5. Central European
 - 5a. Subatlantic, 5b. Middle European, 5c. Hemiboreal Baltic
 - 6. Sarmatian
 - 6a. Central Russian, 6b. Volgan-Tartarian
 - Bc. ALPINO-CAUCASIAN
 - 7. Cévenno-Pyrenean
 - 7a. Prepyrenean, 7b. Central Pyrenean, 7c. Eastern Pyrenean, 7d. Cévennoan, 7d. Auvergnean
 - 8. Alpine
 - 8a. Mediterranean Alpine, 8b. Western Alpine, 8c. Central Alpine, 8d. Eastern Alpine
 - 9. Apennino-Balkan
 - 9a. Apennine, 9b. Padanian, 9c. Ilyrian, 9d. Pindian, 9e. Bulgarian
 - 10. Pannonic-Carpathian
 - 10a. Pannonic, 10b. Carpathian, 10c. Danube-Moldavian
 - 11. Eastian
 - 11a. Dobruja-Crimean, 11b. Donean
 - 12. Euxine
 - 12a. Orocimean, 12b. Coastal Georgian, 12c. Pontic
 - 13. Caucasian
 - 13a. Western Caucasian, 13b. Eastern Caucasian, 13c. Lesser Caucasus
 - C. MEDITERRANEAN
 - Ca. WESTERN MEDITERRANEAN
 - 14. Coastal Lusitano-Andalusian
 - 14a. Gado-Algarvian, 14b. Sado-Divisorian.
 - 15. Mediterranean West Iberian
 - 15a. Luso-Extremaduran, 15b. Carpetano-Leonese
 - 16. Betician
 - 17. Murcian-Almerian
 - 18. Mediterranean Central Iberian
 - 18a. Castilian, 18b. Oroiberian, 18c. Low Aragonese
 - 19. Balearic-Catalonian-Provençal
 - 19a. Valencian-Catalonian, 19b. Occitanian-Provençal, 19c. Balearic
 - 20. Itole-Thyrrhenian
 - 20a. Corsican, 20b. Sardinian, 20c. Sicilian, 20d. Coastal West Italian
 - Ca. EASTERN MEDITERRANEAN
 - 21. Adriatic
 - 21a. Apulian, 21b. Epiro-Dalmatian 21c. Peloponnesian
 - 22. Graeco-Aegean
 - 22a. Cretan, 22b. Attico-Thessalio-Macedonian, 22c. Tracian, 22d. Aegean,
 - 22e. Western Anatolian
 - 23. Cilicio-Phoenician
 - 23a. Cilician, 23b. Phoenician, 23c. Cypriot
 - Cc. CANARIAN
 - 24. Canarian
 - 24a. Western Canarian, 24b. Eastern Canarian.
 - 25. Madeliran

• • •
53

La vegetación clímax se correspondería, a nivel general, con las series de los encinares mesomediterráneos silicícolas formados por las especies *Quercus ilex* y *Quercus rotundifolia*, ver figura 17. La zona también se caracteriza por la presencia de especies típicamente mediterráneas, tales como el romero (*Rosmarinus officinalis*), la coscoja (*Quercus coccifera*), la atocha (*Stipa tenacissima*), la salvia (*Salvia lavandulifolia*), *Ulex Europeaus*, cardo (*Silybum marianum*), entre otros (Martínez, J., 2008: JC-CLM, 2013).

Figura 17. Formaciones de encinares en el paisaje del Campo de Calatrava.

La vegetación acuática se encuentra en zonas de cuerpos de agua permanentes como el río Jabalón, también en estructuras denominadas humedales fluctuantes, que son inundables temporalmente. Las plantas acuáticas de las zonas húmedas estacionales mueren con la desecación, pero antes de que esto ocurra producen muchas semillas y esporas de pequeño tamaño, que quedan retenidas en los sedimentos a la espera de un nuevo periodo de inundación que les permita germinar. En esta categoría se identifican especies del género *Scirpus* y *Juncus* (Martínez, J., 2008: JC-CLM, 2013).

Figura 18. Vegetación acuática y de ribera de los géneros *Scirpus* y *Juncus*.

Existen especies halófilas que se instalan en las cuencas de las lagunas temporales, arroyos, quebradas y escorrentías, que al secarse durante el verano, están adaptadas a

las condiciones de salinidad elevada del suelo. Las aglomeraciones vegetales forman pastizales de distinta estructura y composición que depende del grado de desecación y salinidad del medio (ver la figura 18).

Las tierras llanas que predominan en la zona de estudio están sometidos a una intensa explotación agraria, por lo que la vegetación arbórea (encinar) que debió existir en gran parte de Campo de Calatrava ha sido sustituida por un matorral muy degradado en el que alternan especies leñosas con bulbosas y gramíneas, quedando reducido a pequeñas sierras. La vegetación de ribera, también muy degradada, tiene cierta diversidad en el río Guadiana con comunidades de tarays, rosáceas, zarzas, juncos, masiega y carrizo (Hernández, E., et al., 2011).

4.3.2. Fauna.

Campo de Calatrava es de especial interés para distintas especies de aves acuáticas, tales como las anátidas y ardeidas, ya que en sus rutas migratorias realizan pernoctaciones en la zona. Entre la avifauna acuática destacan el ánade azulón (*Anas platyrhynchos*), focha común (*Fulica atra*) y la garza real (*Ardea cinerea*). Las zonas húmedas de la zona forman ecosistemas especiales que gozan de protección y están bajo regímenes de conservación bajo las autoridades locales y regionales (JC-CLM, 2013).

En La avifauna está claramente dominada por Gorriones (Psediformes) y Estorninos (*Sturnus*) en las zonas urbanas y los poblados. Otras especies de relevancia son las aves esteparias, normalmente depredadoras. Ver en la tabla 5.

Tabla 5. Aves esteparias presentes en la provincia de Ciudad Real. Fuente: Datos de la Directiva Hábitat, 2008 (JC-CLM, 2013).

Nombre común	Nombre científico	Nombre común	Nombre científico
Cernícalo primilla	<i>Falco naumanni</i>	Sisón común	<i>Tertrax tetrax</i>
Avutarda común	<i>Otis tarda</i>	Alcaraván común	<i>Burhinus oediconemus</i>
Ganga ortega	<i>Pterocles orientalis</i>	Ganga ibérica	<i>Pterocles alchata</i>
Cigüeña blanca	<i>Ciconia</i>	Águila azor perdicera	<i>Hieraetus fasciatus</i>
Águila imperial	<i>Aquila adalberti</i>	Águila real	<i>Aquila chrysaetos</i>
Aguilucho cenizo	<i>Circus pygargus</i>	Aguilucho pardo	<i>Circus cyaneus</i>
Aguilucho lagunero	<i>Circus aeruginosus</i>		

En las zonas de cultivos habitan mamíferos de todo tipo, entre estos los múridos (*Rattus* sp. y *Mus* sp.), que están asociados a las actividades agrícolas y al consumo de cereales. Es destacable mencionar que en el río Jabalón se encuentran poblaciones estables de nutrias (*Lutra lutra*).

En cuanto a los reptiles, en la zona de cultivo, pueden localizarse culebras, tales como: la culebra bastarda (*Malpolon monspessulanus*), de escalera (*Elaphe scalaris*), de collar (*Natrix natrix*) y viperina (*Natrix maura*). Entre los anfibios, encontramos ejemplares de sapo común (*Bufo bufo*), sapo corredor (*Bufo calamita*), sapo partero común (*Alytes obstetricans*) y sapillo moteado (*Pelodytes punctatus*).

4.4. Demografía y usos del suelo.

No existen evidencias del pasado prehistórico, pero es probable que hayan existido asentamientos humanos desde la Edad de Bronce. También es posible que hubiese presencia romana y visigoda. Si están documentados los asentamientos durante la ocupación árabe de la península ibérica desde el siglo VII. El rey de Castilla Alfonso VIII conquistó el área al ocupar la antigua ciudad Calatrava (hoy en día llamada Calatrava La Vieja) y tras la derrota de los musulmanes en 1212 en la batalla Naves de Tolosa, esta zona se convirtió en la frontera entre los reinos cristianos y los musulmanes. Por ello a partir del siglo XIII, se estableció la orden de Calatrava, con sede en Almagro, para la vigilancia y protección de la parte Sur de la Meseta de las tropas islámicas.

A lo largo de los siglos, la población de esta región se ha caracterizado por su dispersión debido a las malas comunicaciones, pocos capitales y la dependencia del medio agrario. La situación comenzó a cambiar durante la segunda mitad del siglo XIX con la llegada del ferrocarril, que mejoró el comercio de los productos agrícolas y mineros. Ya en el siglo XX, muchos pueblos aumentaron sus poblaciones, como sucedió en el resto de España, con la llegada de las mejoras en sanidad y la industrialización en núcleos urbanos grandes como Ciudad Real y Puertollano. Sin embargo a finales de este siglo, algunos pueblos perdieron población en favor de ciudades más grandes, ya que éstas ofrecen más oportunidades laborales fuera del ámbito agrario.

Tabla 6. Listado de municipios que conforman Campo de Calatrava. Fuente: Instituto Geográfico Nacional e Instituto Nacional de Estadística. Elaboración propia.

Municipio	Población	Sup. km ²	Municipio	Población	Sup. km ²
Ciudad Real	74014	284,98	Poblete	1580	27,82
Puertollano	51305	226,74	Corral de Calatrava	1241	148,77
Miguelturna	13582	118,37	Fernán Caballero	11650	103,96
Bolaños de Calatrava	12374	87,90	Granátula de Calatrava	963	152,65
Almagro	8581	249,73	Valenzuela de Calatrava	790	44,08
Argamasilla de Calatrava	6018	165,94	Picón	691	59,57
Moral de Calatrava	5538	188,20	Villamayor de Calatrava	626	144,81
Calzada de Calatrava	4458	410,94	Ballesteros de Calatrava	510	57,83
Torralba de Calatrava	3069	101,58	Los Pozuelos de Calatrava	471	84,00
Pozuelo de Calatrava	2894	99,67	Caracuel de Calatrava	163	9,92
Carrión de Calatrava	2849	95,77	Cañada de Calatrava	117	29,90
Aldea del Rey	2047	154,31	Villar del Pozo	110	13,23
Alcolea de Calatrava	1635	70,79	TOTAL	196791	3131,46

La historia de la zona es fiel reflejo del uso del suelo existente y su aspecto actual. Las actividades antrópicas han modificado el espacio geográfico de Campo de Calatrava durante todo este tiempo. Una parte importante del territorio se dedica a las actividades de cultivos extensivos de cereales (incluyendo los que se alternan con barbecho), y una fracción menor a áreas cultivadas no boscosas con plantas leñosas (huertos, arboledas, olivar, viñedos, dehesas) (JC-CLM, 2013). Los núcleos urbanos son de baja población (ver tabla 6) por lo que la ocupación del suelo con este fin es muy baja. Son destacables los esfuerzos realizados por las administraciones públicas para la conservación de los humedales y lagunas, mediante planes de gestión de recursos naturales y protección legal.

CAPÍTULO 5. MATERIALES Y MEDIOS

Las investigaciones aplicadas de la teledetección requieren de información adquirida por sensores remotos. El objeto de esta tecnología es la obtención de información de la superficie terrestre. Así mismo, en algunos estudios, se requieren datos complementarios que apoyen los datos previamente adquiridos.

Para realizar el estudio propuesto se adquirieron una serie de imágenes hiperespectrales tomadas sobre los análogos naturales de emisiones de CO₂ presentes en Campo de Calatrava. Como se ha descrito anteriormente, las imágenes hiperespectrales suelen ser conjuntos de datos muy voluminosos y relacionados entre sí. Además existen unas distorsiones que se deben tener en cuenta antes de su análisis, causadas por los errores internos del sensor, efectos atmosféricos, geográficos y topográficos (descritos en el apartado 3.4). Las imágenes adquiridas recibieron un tratamiento previo para remover esas fuentes de errores e interferencias, de tal forma que no se vea afectado el análisis posterior. Estos datos conforman el punto de partida de este estudio.

Como información complementaria se han utilizado datos sobre la geología de la zona, así como otras fuentes procedentes de imágenes remotas. A continuación se describen los materiales y medios empleados en este estudio.

5.1. Imágenes hiperespectrales.

El 2 de junio de 2011, se realizó la campaña de un vuelo para adquirir una serie de imágenes hiperespectrales sobre la zona del campo de Calatrava. La tarea fue solicitada al Área de Teledetección del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA). La campaña se realizó con el apoyo logístico del Escuadrón 403 del Centro Cartográfico y Fotográfico del Ejército del Aire (CECAF) con base en el aeródromo madrileño de Cuatro Vientos. En el anexo 1, se listan las imágenes adquiridas y sus características más destacables.

Figura 19. Plataforma de vuelo CASA 212-200 “Paternina”.

La plataforma utilizada fue un avión CASA 212-200 “Paternina”, perteneciente al INTA y operado por CECAF, que fue modificado para la realización de campañas de TDA. Este avión forma parte de “European Network of Aerial Platforms for Geo-Science Research” EUFAR (ver figura 19). Las características técnicas de la plataforma utilizada son las siguientes:

- Avión turbohélice de ala alta.
- Velocidad de crucero: 140 Kts (72m s^{-1}).
- Techo operativo: 25000 ft (7600 m).
- Autonomía máxima: 6 horas.
- Cabina no presurizada.
- Volumen de cabina: 22 m^3 (6.5m x 2.10m x 1.8m).
- Carga máxima: 2100 kg.
- Potencia eléctrica: 125A/28VDC & 2000VA/220VAC.

La zona volada corresponde al área que cubre parte de Campo de Calatrava. La campaña diurna se realizó con el cielo despejado y viento fuerte del noreste. No obstante existieron turbulencias fuertes en las pasadas de menor altitud.

Tabla 7. Datos del plan de vuelo del INTA, junio 2011.

ID_Line	Altitud (msnm)	Orientación (true)	Scan (rps)
P14AD	3673	336	12,5
P13AD	3673	142	12,5
P12AD	3734	142	12,5
P11AD	3734	322	12,5
P08BD	1646	360	35
P07BD	1646	180	35
P06BD	1646	360	35
P05BD	1646	180	35
P04BD	1646	360	35
P03BD	1646	180	35
P02BD	1646	360	35
P01BD	1646	180	35

Los instrumentos utilizados para la adquisición de las imágenes son dos radiómetros hiperspectrales aeroportados: el Airborne Hyperspectral Scanner (AHS) y el Compact Airborne Spectrographic Imager (CASI) 1500i.

Los datos de la geolocalización de las imágenes se obtuvieron mediante el módulo de determinación de actitud y posicionamiento. El sistema está compuesto por los equipos APPLANIX POS/AV 410 GPS/INS V4 y la unidad de medidas inerciales (IMU). El módulo proporciona medidas de actitud y posicionamiento suficientemente precisas para geolocalizar datos de las imágenes. Previamente se requirió la calibración de todo el sistema (plataforma + sensores remotos + GPS/INS) a través de un vuelo “boresight” o “bundle adjustment”. El margen de error está en el orden de 0.05-0.3 m.

Figura 20. Diagrama del plan de vuelo a 3673 m y 3734 m (a), y 1646 m (b) de altitud sobre el nivel normal respectivamente.

En la figura 20 se aprecia la planificación de las trayectorias del vuelo sobre Campo de Calatrava. En este estudio los dos sensores tomaron datos simultáneamente desde la plataforma a dos alturas, a 1646 m, 3673 m y 3734 m (ver tabla 7), para generar imágenes de distintas resoluciones espaciales. Cada trayectoria corresponde a la adquisición de dos imágenes hiperspectral (una por cada sensor). Se voló primero a lo mayor altura (3673m), empezando por la trayectoria P11AD en orientación noroeste (332 grados) hasta finalizar en la trayectoria P14AD. Pasado unos 20 minutos aproximadamente, se realizó la segunda fase a una altura menor (1646m), iniciando por la pasada P08BD en orientación sur (180) hasta finalizar en la trayectoria P01BD. En la tabla 7 se detalla con más precisión la totalidad del vuelo.

En total se han adquirido doce imágenes por cada sensor (correspondientes a las pasadas del plan de vuelo de la figura 20), de las cuales cuatro corresponden a las alturas más altas (3673 y 3734 m) y las ocho restante a la altura menor (1646 m), para un total de 24 imágenes en total. En el anexo 1 se detallan las características de cada imagen.

5.1.1. Imágenes hiperespectrales del sensor Airborne Hyperspectral Scanner (AHS).

El sensor AHS (figura 21) es un sensor hiperespectral aeroportado de barrido mecánico (whiskbroom scanner). Su diseño se ajusta a las necesidades identificadas a partir de la experiencia del Laboratorio de Teledetección del INTA. Con este sistema el INTA pretende ofrecer a la comunidad científica una herramienta de alta resolución espectral, radiométrica y espacial.

Figura 21. Sensor Airborne Hyperspectral Scanner (AHS).

El AHS se opera nominalmente desde la aeronave CASA C-212-200 del INTA, adecuadamente equipada para campañas de teledetección. Las características principales del sensor son las siguientes:

- Diseño óptico: barrido por espejo giratorio, óptica primaria reflectiva (tipo gregoriano afocal) con IFOV único y común para todas las bandas.
- FOV: 90°.
- IFOV: 2,5 mrad.
- Velocidad de barrido del espejo: 6,25; 12,5; 18,7; 25; 35 rps.

- Ochenta bandas espectrales desde 0,44 μm hasta 13,2 μm . Cinco puertos ópticos que cubren las regiones espectrales del visible y el infrarrojo, ver tabla 8.

Tabla 8. Especificaciones de las bandas espectrales del sensor AHS.

	Puerto 1 VIS / IR cercano	Puerto 2A	Puerto 2 IR medio	Puerto 3 IR medio	Puerto 4 IR térmico
Rango (μm)	0,442 - 1,019	1,55 – 1,65	1,9 – 2,5	3,03 – 5,41	7,95 – 13,17
Ancho (FWHM nm)	28	90	18	30 - 40	400 - 550
$\lambda/\Delta\lambda$ (mínimo)	~16	~9	~156	~9	~17
Nº de bandas	20	1	42	7	10

- Detectores: matriz lineal de fotodiodos de silicio para el puerto 1, de InGaAs en el puerto 2A, detectores de InSb en los puertos 2 y 3, y MCT en el puerto 4, estos últimos refrigerados con nitrógeno líquido a 77K.
- Bits de digitalización: 12 bits.
- Número de píxeles imagen: 750 píxeles/línea.
- Fuentes de referencia internas: dos cuerpos negros cuya temperatura es seleccionable, son observados y registrados en cada línea imagen, y proporcionan un valor de "radiancia cero" en los canales reflectivos (1, 2 y 2A) y niveles de referencia para la calibración de los canales "emisivos" de los puertos 3 y 4.

5.1.2. Imágenes hiperespectrales del sensor Compact Airborne Spectrographic Imager (CASI) 1500i

El otro equipo operado desde la misma nave del INTA se denomina CASI 1500i (figura 22). Es un sensor hiperespectral aeroportado del tipo pushbroom en la región VNIR (visible e infrarrojo cercano). La imagen se genera gracias a una matriz bidimensional de CCDs mediante el movimiento relativo del avión respecto a la superficie terrestre.

Figura 22. Sensor Compact Airborne Spectrographic Imager (CASI) 1500i

El INTA incorporó este sistema en el año 2009 con la finalidad de ofrecer mayor resolución espectral, radiométrica y espacial en una región del EEM significativamente demandada por la comunidad científica. Las características principales del sensor son las siguientes:

- FOV: 40°.
- IFOV: 0,49 mRad.
- Rango espectral (Cobertura completa): 380-1050 nm.
- Resolución espacial por debajo del metro.
- Bits de digitalización: 14 bits.
- Número de píxeles imagen: 1500 píxeles/línea.
- Configurable espectralmente.
- Hasta 288 canales espectrales (FWHM: 2,4nm).
- IMU (Unidad de Medida Inercial) integrada en el sensor.

Tabla 9. Comparación de la configuración de sensores AHS y CASI 1500i. Fuente: INTA.

	AHS	CASI 1500i
FOV & IFOV ²	90° & 2,5 mrad	40° & 0,49 mrad
Altura de vuelo respecto al terreno	983 m / 3000 m	983 m / 3000 m
Resolución espacial en el nadir (GIFOV)	2,5 m / 7,5 m (en el nadir)	0,5 m / 1,5 m (en el nadir)
Cobertura transversal	2000 / 6000 m	716 / 2184 m
Velocidad barrido	35 rps / 12,5 rps	22 ms
Sistema de navegación inercial	encendido	encendido

A diferencia del sensor AHS, el CASI 1500i solo posee un puerto con todas las bandas espectrales. En la tabla 9 se comparan algunas de las características más relevantes de los dos sensores.

² Field of View (FOV) o campo de visión angular total: corresponde al ángulo que delimita el ancho de cobertura del sensor. Instant Field of View (IFOV) o campo de visión instantáneo: corresponde a la unidad de medida de un sensor correspondiente con un píxel. (Sobrino, J., 2000).

5.1.3. Correcciones radiométricas realizadas por el suministrador.

Las imágenes adquiridas por el INTA son procesadas para remover las distorsiones radiométricas que surgen durante la adquisición de los datos. El personal del INTA estuvo encargado de realizar la calibración radiométrica, de los errores asociados al sensor, y la construcción de la información geográfica de las imágenes. En el anexo 1 se detallan los procedimientos realizados por el INTA en los documentos: “proceso_hiperespectral_campaña_campo_CALCO11_v3.ppt” y “AHS_CASI1500_CALCO11_L1b_v1.doc”.

5.1.3.1. Imágenes del sensor AHS.

Las imágenes obtenidas por el sensor AHS fueron convertidas a ficheros del formato del software ENVI, usando la herramienta AHSImportUtility. El resultado de este proceso se denomina nivel L1a, que consiste en ficheros expresados en ND sin procesamiento geométrico ni radiométrico. También se genera un fichero de estadísticas para el chequeo de calidad de las imágenes adquiridas. Estas estadísticas incluyen medidas de la relación señal a ruido (SNR), calculada como el cociente entre la radiancia media de la imagen y la desviación típica de la señal registrada sobre los cuerpos negros de referencia en vuelo. Todos los ficheros resultaron adecuados para el proceso y se adjuntó una muestra de los valores de SNR obtenidos (figura 23).

Figura 23. Relación señal a ruido de los ficheros obtenidos por el sensor AHS.

El proceso de calibración radiométrica se realizó dividiendo las imágenes en dos clases de ficheros, los correspondientes a los canales VIS/NIR/SWIR (PT12 y PT3) y los térmicos

(PT4). El procedimiento es diferente en cada región del EEM. En ambos casos, el ND en cada banda fue convertido a radiancia en el sensor en $\text{nW cm}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$. En el proceso de calibración del PT12, las imágenes originales (*.raw) se convierten a radiancia recibida en el detector mediante una transformación definida por:

$$L_{s(i,j,k)} = \text{scale}_{(k)} * (ND_{0(i,j,k)} - ND_{bb(i,k)}) / \text{gain}_{(k)}$$

Donde $L_{s(i,j,k)}$ es la radiancia en el píxel "i,j" del canal "k", en $\mu\text{W cm}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$ (equivalente a $10 * \text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$), $\text{scale}_{(k)}$ es el factor de conversión para el canal "k", calculado a partir de calibraciones en tierra y anotado en el fichero AhsCalibrationFile_i250.csv, $ND_{0(i,j,k)}$ es el valor original para el píxel "i,j" en el canal "k", $ND_{bb(i,k)}$ es el valor promedio de los cuerpos negros para la fila "i" en el canal "k", $\text{gain}_{(k)}$ es la ganancia utilizada en la adquisición de la imagen del canal "k", anotada en el fichero *flight.csv. Posteriormente se ha aplicado un factor corrector para incorporar información actualizada de los coeficientes de calibración, de manera que el valor final de los productos L1b_PT12s es el producto de $L_{s(i,j,k)}$ por dicho factor.

5.1.3.2. Imágenes del sensor CASI 1500i.

La corrección radiométrica de las imágenes se realizó ejecutando la herramienta "master_radcorr_batch.scr", usando como punto de partida los ficheros de extensión .raw. Estos archivos contienen los ND registrados por el sensor CASI. La herramienta inicia el programa de calibración radiométrica del fabricante del sensor, que genera los ficheros L1b que contienen radiancias ($\mu\text{W cm}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$) en el sensor.

Las imágenes CASI sufren un desplazamiento espectral variable del orden de 2.4 nm. Para corregir este efecto las imágenes L1b se analizan para estimar el desplazamiento espectral sufrido y se genera un nuevo fichero de calibración espectral de la misma. La imagen L1b inicial es desplazada espectralmente con la información contenida en el nuevo fichero de calibración espectral.

A los ficheros se les realizan los siguientes test de calidad, que quedan reflejados en los ficheros *_stats.csv: saturación y estadísticos del nivel L1a, análisis de la corriente oscura, estadísticos del nivel L1b, incluyendo ruido y SNR. Por último las imágenes L1b,

en formato geomática PCI, se transforman a formato ENVI estándar (*.L1b.bsq) que es el producto recibido. En la figura 24 se puede observar los valores de SNR obtenidos.

Figura 24. Relación señal a ruido de los ficheros obtenidos por el sensor CASI 1500i.

El proceso geométrico se ejecuta con la macro “SBET_batch_110602.src” que genera un fichero con las correcciones de navegación. En este paso se completa la información del fichero *_QD_L1b.txt. El segundo paso consiste en ejecutar la macro “geocor_batch_110602.src” que genera el producto L1c, donde se crean ficheros con la radiancia en el sensor georreferenciada. Además en este proceso se genera también un fichero *.glu que contiene en las dos primeras capas las coordenadas de latitud y longitud en la proyección universal transversal de Mercator (UTM) de cada píxel. Este producto acompaña a los ficheros generados en el nivel L1b.

Figura 25. Comparación entre: (a) corrección geométrica de las pasadas P02 y P12 del sensor CASI 1500i (der.) y AHS (izq.); (b) corrección radiométrica de la pasada P02 sobre suelo desnudo de los dos sensores, en azul: CASI y en rojo: AHS.

En la figura 25 a se muestran unos ejemplos de la corrección geométrica de las pasadas P02 y P12, del vuelo bajo y alto respectivamente, tanto del CASI (las dos imágenes de la

izquierda) como del AHS (imágenes de la derecha). Se puede ver la buena correspondencia geométrica entre ambos sensores. La exactitud geométrica teórica es menor de un píxel en los dos sensores y se ha observado una exactitud del orden de un píxel.

En la misma figura 25 b se muestran dos espectros extraídos de la pasada P02 sobre una superficie de suelo desnudo, se presenta en rojo el espectro obtenido de la imagen AHS y el azul del CASI. Se puede destacar la buena correlación de ambos espectros, indicando una corrección radiométrica adecuada. La imagen AHS muestra menos detalle ya que tiene menos canales y estos a su vez son más anchos que los del CASI1500i.

5.2. Firmas Espectrales de Referencia (FER) adquiridas en campo con el espectrorradiómetro.

Simultáneamente a la adquisición de las imágenes AHS y CASI1500i se obtuvieron mediciones espectrales sobre distintas coberturas terrestres (suelos, vegetación, cuerpos de agua). La medición de reflectancia de superficie se realizó con el espectrorradiómetro ASD FieldSpec-3 de fibra óptica, de carácter portátil para facilitar las labores en campo. Sus características principales se mencionan en la tabla 10.

Tabla 10. Características del espectrorradiómetro de campo ASD FieldSpec 3.

FOV (°)	25		
Resolución espacial (cm)	1 - 20		
Rango espectral (nm)	Visible	Infrarrojo cercano	Infrarrojo
	350-1000	1000-1700	1700-2500
FWHM (nm)	3	10	12

Estos datos se denominan firmas espectrales de referencia (FER), ya que las mediciones reflejan las características espectrales propias de un elemento de forma muy detallada. La resolución espectral de la firma es de 1 nm en la región visible e infrarroja del EEM, aunado a que la medición se realiza a escasos metros de altura de la superficie (aproximadamente 1m).

En la tabla 11 están listados las FER obtenidas durante la adquisición de las imágenes hiperespectrales y en el anexo 2 se encuentran los ficheros con los valores de reflectancia de cada una. Las coberturas se seleccionaron bajo el criterio de representar los elementos más comunes en Campo de Calatrava y los análogos naturales de emisiones de gases documentados, tanto secos como húmedos. Destaca la variedad de especies naturales como cultivables, así como diferentes tipos de suelo.

Tabla 11. Ubicación de las coberturas de las muestras de campo. Fuente: Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial.

Zona	Cobertura	Coordenadas	
		Este	Norte
Zona al sur de Valenzuela de Calatrava	Almendro (am01)	432.446,215	4.297.220,476
	Cebada (ce01)	433.279,162	4.300.156,680
	Coscoja (co01)	432.410,788	4.297.250,666
	Olivo (ol01)	434.095,536	4.300.760,689
	Pastizal (pa01)	432.429,887	4.297.257,752
	Quercus (qu01)	432.436,049	4.297.235,571
	Tomillo (to01)	432.447,530	4.297.257,681
	Viñedo (vi01)	433.213,076	4.299.972,762
	Suelo desnudo 1 (sd01)	433.314,282	4.300.117,451
	Suelo desnudo 2 (sd02)	433.376,348	4.300.077,775
	Suelo desnudo 5 (sd05)	432.446,414	4.297.375,500
	Suelo desnudo 6 (sd06)	432.486,232	4.297.400,276
Barranco Pequeño y Baño Chico	Agua	429.164,563	4.294.551,407
	Carrizo		
	Plantita y limo		
	Piscina	429.376,341	4.294.469.102
	Liquen	429.214,260	4.294.656.599
	Roca		
La Sima	Fuga de CO ₂ (baja altura)	434.411,135	4.297.240,808
	Fuga de CO ₂ (elevada altura)		
	Vegetación		
	Ulex vivo	434.431,885	4.297.145,446
	Ulex muerto		

Las muestras se agrupan según la zona de adquisición. La mayoría de las coberturas se seleccionaron en áreas cultivables y sus alrededores, ubicadas entre uno y tres kilómetros al sur de la localidad Valenzuela de Calatrava. El segundo grupo lo conforman las FER obtenidas en La Sima y el tercero Barranco Pequeño (figura 26).

Figura 26. Ubicación de las firmas espectrales de referencia. En las elipses se señalan áreas de análogos naturales.

En estos se pretende obtener información de los análogos naturales presentes y los elementos del entorno a su alrededor. Las firmas espectrales resultan también muy útiles para la clasificación temática y la verificación del pretratamiento de las imágenes digitales.

5.3. Productos cartográficos complementarios.

Las imágenes hiperespectrales se apoyan considerablemente en otras fuentes de información. Buena parte de esta proviene de la cartografía geográfica y temática que, entre otras funciones, mejoran la interpretación de las imágenes hiperespectrales y sustentan el análisis de los datos espectrales. En esta investigación se obtuvieron ortofotos, modelos digitales de terreno (MDT) y cartografía geológica. A continuación se describirán estas fuentes de datos.

5.3.1. Ortofotos y Modelos Digitales de Terreno (MDT).

La fotografía aérea es la base para la realización de cartografía sobre la información geográfica en general, tales como: ocupación del suelo, urbanismo y ordenación del territorio, catastro, gestión forestal, hidrografía, entre otros. El Ministerio de Fomento de España, a través del Instituto Geográfico Nacional (IGN) y el Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG), ejecuta el Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) tiene como objetivo la obtención de ortofotografías aéreas digitales con resolución de 25 o 50 cm y alta precisión de todo el territorio español, con un período de actualización de 2 a 3 años (IGN, s.f.). La información generada es de carácter abierta, por lo que representa un apoyo muy importante para la investigación española y, en particular, a este estudio.

Las ortofotos son fotografías aéreas que tienen correcciones geométricas, de tal forma que representan correctamente las dimensiones de la superficie terrestre; también están georreferenciadas y tienen la particularidad de que tienen una escala pequeña que les otorga gran detalle de la cobertura terrestre (IGN, s. f.). En este estudio se utilizaron, como información de referencia, las ortofotografías 785, 811 y secciones de la 784 y 810, del MNT50 (ver figura 27) de Campo de Calatrava. Sus especificaciones técnicas son: sistema geodésico de referencia ETRS89, proyección UTM en el huso 30 y tamaño de píxel 50 cm. Ver el anexo 3.

Figura 27. Distribución de hojas de la zona de estudio en el Campo de Calatrava. Fuente: Instituto Geográfico Nacional.

Los MDT son un conjunto de datos georreferenciados que representan la altitud de la superficie sobre el nivel del mar. El MDT es parte de los modelos de elevaciones, ya que estos incluyen datos de la altitud de otros elementos como la vegetación y construcciones. En la actualidad, estos datos suelen ser adquiridos por técnicas de fotogrametría y, en casos más avanzados, por el sistema LIDAR. Al igual que la ortofotografía, el MDT para este estudio corresponde a las hojas mencionadas del MNT50 y tiene las siguientes características: sistema geodésico de referencia ETRS89, proyección UTM 30 y tamaño de píxel 5 m (ver anexo 4).

5.3.2. Cartografía Geológica.

De acuerdo con la geología de la zona (ver apartado 4.2.1), los mapas geológicos ubican en el espacio algunas propiedades y estructuras que estén asociadas a las emisiones de gases. En la cartografía geológica se indican las fallas, volcanes, flujos de lava, tipos de materiales, período geológico de las rocas, entre otros. Estos mapas recogen datos de investigaciones que datan desde hace más de un siglo, que han evolucionado hasta las últimas actualizaciones disponibles mediante el avance de los conocimientos y las técnicas (IGME, s. f.). En el anexo 5 se presentan los mapas geológicos de la zona de estudio.

5.4. Mediciones de Flujo de CO₂ en análogos naturales.

Estudios previos sobre las características geológicas de la zona (Elío, J., 2012; Ubaldo, R., 2010), han cuantificado caudales de gases de origen subterráneo, entre ellos el CO₂. Su metodología consistió en plantear un muestreo aleatorio simple o sistemático (malla) de zonas documentadas sobre la presencia de emisiones de gases. Elío, J. et al. (2012), utilizaron la técnica de la cámara de acumulación de gas para cuantificar las emisiones. Esta se basa en mediciones continuas de las concentraciones de CO₂ dentro de una cámara invertida colocada sobre el suelo. Una bomba de caudal bajo (20 ml/s) dirige el gas de la cámara hacia un espectrofotómetro de infrarrojos (equipado con un sensor Li-820 IR).

Además han realizado mediciones de isótopos de radón, ya que este gas es uno de los indicadores naturales empleados para detectar fallas o fracturas en el suelo. Por lo tanto fue utilizado para determinar si los gases eran de origen profundo, y descartar que fueran producto de la actividad microbiana del suelo. En su investigación, Elío et al. (2012), midieron la concentración a través de dos métodos diferentes, empleando el equipo Sarad RTM 2100 y la cámara de ionización de radón V.O.S. bran, modelo RM-2.

La información de estos estudios ha servido como base para determinar la ubicación e identificación de aquellos puntos con emisiones de gases, lo que contribuye a localizar las zonas de interés para la investigación. Aquellas zonas con un caudal de gases alto (100 Kg/d o más) pueden tener una respuesta espectral distinta a aquellas con un caudal bajo (100g/d). Los datos usados corresponden a las zonas conocidas como: La Sima, Barranco Pequeño y Baño Chico, que están asociadas a zonas de caudales de emisión bajos, que en el anexo 6 se detalla la información sobre las mediciones de flujo obtenidas por Elío, J. (2015). Cabe destacar que la información de flujo fue organizada en un shapefile³ (.shp) para relacionar estos datos con la ubicación geográfica y las imágenes hiperespectrales. La ubicación de estos análogos naturales está asociada con la localización de las firmas espectrales de campo mencionadas en la tabla 11 del apartado 5.2.

Los análogos naturales documentados presentan unas características definidas. La presencia de agua es una de estas, lo que permite diferenciar en dos grandes grupos los puntos de emisiones de gases conocidos. En el estudio de Gutiérrez del Olmo, J. (2015), La Sima se denominó “hervidero seco” ya que no hay presencia de agua, mientras que Barranco Pequeño y Baño Chico los identificó como “hervideros húmedos”, porque presentaban una charca de agua con indicios claros de burbujeo y rodeados de vegetación.

³ Formato de archivo basado en el sistema vectorial, utilizado por algunos paquetes informáticos de sistemas de información geográfica.

5.4.1. Análogos naturales “Hervideros” Húmedos.

Estos enclaves se caracterizan por presentar pequeñas charcas con burbujeo y vegetación de ribera (apartado 4.3.1) en las cercanías. En algunos casos, la distribución de las plantas alrededor de las charcas tiene forma de elipse. La vegetación suele ser muy densa en el punto cercano al agua y disminuyendo tanto en densidad como en altura al alejarse del agua, pasando a existir solo pastos y matorrales a partir de una distancia.

Figura 28. Puntos de medición de flujo ($\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$) de gases por Elío, J. (2015) en las zonas Baño Chico (izq.) y Barranco Pequeño (der.).

Las localizaciones donde se realizaron los muestreos y mediciones fueron: Barranco Pequeño y Baño Chico (figura 28). Estas zonas se ubican en las proximidades del río Jabalón, donde también se han cuantificado mediciones de caudal de hasta ($140 \text{ g m}^{-2} \text{d}^{-1}$).

5.4.2. Análogos naturales secos.

La Sima es en una gruta pequeña dentro de una depresión, cercana al sistema de colinas al norte de Granátula de Calatrava, las cuales están asociadas a la actividad volcánica que hubo en la zona y a unas fallas documentadas (González, E., 2010; Ubaldo, R., 2010). La Sima es un análogo natural seco con emisiones elevadas, hasta el momento, el único del que se tiene registro en la bibliografía. En este punto se han cuantificado flujos hasta de $6000 \text{ g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ de CO₂, siendo uno de los análogos naturales con mayores flujos cuantificados (Elío, J., et al., 2012).

Figura 29. Puntos de medición de flujo ($\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$) gases por Elío, J. (2012) en La Sima.

Otras características de La Sima son la ausencia de vegetación cerca de la gruta y la presencia de animales muertos. La pequeña depresión genera un efecto de acumulación de CO_2 que evita el desarrollo de vegetación y que actúa como trampa para algunas especies pequeñas de la fauna silvestre.

CAPÍTULO 6. METODOLOGÍA

La utilización de imágenes hiperespectrales para la detección de posibles emanaciones de CO₂, bien sea por el análisis directo de la información espectral o, de forma indirecta, por medio del análisis de la variación en las características del medio que puede circundarlas es uno de los objetivos de este trabajo. En el presente capítulo se presenta la metodología que se propone para alcanzar los objetivos establecidos.

En la presente tesis, las imágenes hiperespectrales constituyen la fuente de datos principal sobre la que se centra el proceso de análisis para identificar emisiones de CO₂. Para alcanzar los objetivos previstos se ha procedido inicialmente a realizar un pre procesamiento de las imágenes de acuerdo con los estándares de la teledetección, proceso que se presenta en el epígrafe 6.1. Tras obtener el producto radiométrico corregido de los posibles errores se procede a analizar las imágenes obtenidas, lo cual se presenta en el epígrafe 6.2. Dos han sido las estrategias que se han estudiado (i) el análisis de las bandas espectrales y la aplicación de las correlaciones cruzadas y (ii) la determinación de los componentes principales de las bandas espectrales, su análisis y la elaboración de ratios.

6.1. Pre-tratamiento de las imágenes hiperespectrales.

Un sistema de detección remota de datos está expuesto a una serie de factores que interfieren con la adquisición de datos, relacionados con los equipos y a las propiedades físicas y químicas de fenómenos naturales externos (posición del sol, la atmósfera). La teledetección aerotransportada requiere un procedimiento para compensar los efectos ocasionados sobre los datos adquiridos, porque sus valores conllevan una distorsión respecto a la realidad en el terreno.

Las imágenes hiperespectrales adquiridas ya presentaban un primer nivel de tratamiento (L1b), que fue realizado por el (INTA). Esto significa que recibieron una corrección radiométrica de las distorsiones inherentes al sensor, y otras de tipo geométrica. No obstante las imágenes carecen de las correcciones atmosféricas y topográficas, que también son necesarias para acercar los valores de las imágenes a la realidad del terreno. Tanto en las imágenes del sensor AHS y CASI1500i, los valores de

los píxeles se encuentran expresados en unidades de radiancia ($\text{nW} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$), en formato BIL/BSQ (propio del software ENVI), y carecen de georreferenciación.

Figura 30. Esquema del pre procesamiento de imágenes.

Entre los productos adquiridos con las imágenes al INTA se incluían unos ficheros adicionales denominados Mapa de Entrada de Geometría (Input Geometry Map IGM). Estos contenían la información geográfica de posiciones de cada imagen. A partir del conjunto de datos se realizaron los procedimientos para la georreferenciación, las correcciones atmosféricas y topográficas correspondientes (ver figura 30). Los programas utilizados fueron ERDAS IMAGINE y ENVI 4.7.

6.1.1. Georreferenciación espacial.

La georreferenciación consiste en asignar a las imágenes digitales una posición en el espacio, es decir, que a cada píxel se le otorga una ubicación basado en un sistema coordenadas, que permite asociar las imágenes digitales en el espacio real. El programa ENVI georreferencia las imágenes a un sistema de referencia de coordenadas (para el caso considerado: UTM y datum WGS 1984), utilizando los datos de un archivo IGM.

La localización geográfica de cada uno de los píxeles fue determinada simultáneamente con la adquisición de las imágenes espectrales. El INTA generó para cada imagen, a partir de estos datos, un archivo IGM. Este consiste en un fichero de dos bandas que almacena la información de las coordenadas X (longitud o este) y las coordenadas Y (latitud o norte). El fichero IGM fue utilizado para crear otro archivo denominado Tabla de Revisión Geográfica (Geographic Lookup Table GLT) que contenía la información sobre la posición que ocupa un píxel original en la nueva imagen a generar. Si los valores del

GLT son positivos, entonces existe una combinación exacta entre el píxel y la ubicación de la imagen de entrada, en cambio si los valores son negativos, se volvió a muestrear utilizando el método del vecino más cercano ya que la imagen no disponía de un píxel de localización exacta para la ubicación en el mapa.

La información obtenida es una imagen digital donde cada píxel tiene asignada una posición geográfica. En esta se eliminan las distorsiones originadas por los movimientos y la orientación del sensor al momento de adquisición de la imagen.

6.1.2. Corrección Atmosférica.

Existen muchas opciones para realizar las correcciones atmosféricas de las imágenes digitales, tal como se mencionó en el apartado 3.4.1. Los programas de tratamiento de información georreferenciada ofrecen herramientas para tal fin. Algunos ejemplos de estas aplicaciones son los comandos automatizados que contiene el programa ENVI: el QUick Atmospheric Correction (QUAC®) y el Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes (FLAASH™)⁴.

Ambos métodos de corrección atmosférica se aplican a las imágenes hiperespectrales, con el objeto de comparar las compensaciones que estas reciben y decidir que método resulta más adecuado. El producto final de la corrección atmosférica es una imagen donde las distorsiones atmosféricas han sido removidas.

6.1.2.1 Método QUick Atmospheric Correction (QUAC).

El método QUAC (Bernstein, L., et al. 2005) permite estimar valores de reflectancia con la información disponible dentro de la imagen espectral (valores de radiancia con calibración radiométrica, la intensidad de la iluminación solar) sin apoyo de información externa. El procedimiento asume una relación lineal entre la reflectancia y la radiancia medida, de acuerdo a cada longitud de onda, lo que se traduce en una aproximación

⁴ FLAASH™, SMACC and QUAC® are licensed from Spectral Sciences, Inc. under U.S. Patent No. 6,909,815 and U.S. Patent No. 7,046,852 B2.

adecuada para la mayoría de escenas. Por lo tanto el método posee ventajas tales como precisión alta, velocidad de cómputo alta e independencia respecto a datos auxiliares.

El módulo QUAC en el software ENVI 4.7 realiza la corrección atmosférica aplicando las teorías descritas anteriormente de forma automatizada. El proceso es capaz de ofrecer valores de la reflectancia de una superficie, en un intervalo de aproximadamente $\pm 15\%$ con respecto a los valores producidos por los modelos físicos, al emplear los parámetros de compensación atmosférica inferidos de la propia imagen hiperespectral. El fundamento del módulo, se basa en que la determinación empírica de la reflectancia promedio de un conjunto de espectros de materiales distintos es independiente de la escena. El producto obtenido es una imagen de reflectancia de la superficie escalada en enteros de dos bits con signos y utilizando un factor de conversión de 10.000.

Como muchos métodos basados en cálculos de transporte radiativo, QUAC determina los parámetros de compensación atmosférica directamente de la información contenida dentro de la escena (espectro observado en el píxel). Sin embargo, a diferencia de otros métodos, su obtención de la profundidad óptica de aerosoles no requiere la presencia de píxeles oscuros. Los planteamientos del algoritmo QUAC son los siguientes:

- Existe un número de píxeles característicos (10 o más) en su espectro (distintos materiales) dentro de una escena.
- La desviación estándar para una colección de materiales diversos es una constante casi independiente de la longitud de onda.
- Existen los suficientes píxeles oscuros en una escena que permiten una estimación adecuada de la contribución base invariante espacialmente.

La primera presunción es usualmente aplicable, ya que solo requiere que unos cuantos píxeles de entre 10^5 a 10^6 aproximadamente muestren espectros diversos. La excepción más notable sería una escena completamente sobre aguas abiertas y profundas, en cuyo caso la reflectancia del material es bien conocida a priori.

La segunda presunción está basada, según Berstein, L., en la observación empírica y probablemente está relacionada a la falta de correlación espectral entre diversos materiales.

La tercera presunción es frecuentemente aplicable, ya que la mayoría de las escenas contendrán un número de píxeles muy oscuros de superficies como los cuerpos de agua, vegetación y sombras. Para los casos atípicos que no cumplan esta condición, existen métodos alternativos para estimar una línea base razonable. Un atributo clave de QUAC es su aplicabilidad a cualquier ángulo de visión del sensor o elevación solar.

6.1.2.2 Método Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes (FLAASH™)

El método FLAASH™ está basado en el modelo de transporte radiativo MODTRAN, que se encuentra disponible en el programa ENVI. Además resulta muy útil aplicar esta herramienta en imágenes hiperespectrales. FLAASH™ usa las funciones básicas del programa MODTRAN, que es un programa de transporte de radiación diseñado para predecir las interacciones de la luz solar al atravesar la atmósfera. El modelo resuelve la ecuación fundamental del transporte de radiación en diferentes rangos del EEM, desde visible, infrarrojos y hasta microondas (en el rango de número de onda 0 – 50.000 cm⁻¹, o longitud de onda 0,2 μm a 5cm). La atmósfera es modelada según sus estratos, siendo horizontalmente homogénea, y sus constituyentes de forma vertical. Dichos constituyentes, moleculares y partículas, se pueden especificar por modelos propios del programa o por el usuario. Además de resolver la ecuación, el modelo simula los efectos de absorción/emisión y dispersión tanto molecular como de las partículas, reflejos y emisiones de la superficie, la irradiancia solar/lunar, flujos horizontales, tasas de enfriamiento, entre otros (Adler-Golden, S. M., 1999).

Las configuraciones FLAASH™ que el usuario puede elegir son las siguientes:

- Modelo atmosférico predeterminado de acuerdo a la localización geográfica de la imagen. Las opciones se basan en las estaciones y las latitudes, tales como las siguientes: tropical, latitud media verano, latitud media invierno o verano, sub-ártico invierno o verano, y la atmósfera estándar para Estados Unidos. En todo caso las denominaciones son orientativas y consisten en promedios.
- La columna de vapor de agua se estima por medio de las propiedades de absorción espectral en zonas específicas del EEM, que se ubican en 1135, 940 y

820 nm, que corresponderían con bandas espectrales en los rangos 1050 – 1210, 870 – 1020 y 770 – 870 nm, respectivamente.

- Modelo de aerosoles que indiquen la cantidad de bruma o partículas en la atmósfera. Esta propiedad se asocia a la visibilidad y en la herramienta se elige entre opciones denominadas rural, urbano, marítima y troposférico.

En el estudio se utilizaron las siguientes opciones según el rango espectral de los sensores, la ubicación de Campo de Calatrava y la fecha de adquisición de las imágenes:

- Modelo atmosférico latitud media verano.
- La columna de vapor de agua en 940 nm.
- El modelo de aerosoles elegido se basó en una visibilidad mayor a 23km.

Adicionales a las opciones mencionadas, existen otras que se relacionadas con el tipo de sensor, las unidades y factores de corrección en las que se expresa la radiancia, entre otros, que se ajustan según las características de las imágenes hiperespectrales. El producto final consiste en una imagen donde las distorsiones atmosféricas han sido removidas.

6.1.3. Corrección Topográfica.

Los efectos del relieve sobre el terreno se ajustan ejecutando el modelo de normalización de valores de brillo en el programa ERDAS IMAGINE. Esta herramienta está basada en la descripción hecha en el apartado 3.4.3. Los siguientes datos son necesarios para llevar a cabo esta acción:

- Ángulo de elevación solar.
- Azimut al momento de la adquisición de la imagen.
- MDT de la zona.

Los datos sobre los ángulos de elevación solar y el azimut solar se obtuvieron de la aplicación Solar Position Calculator, de National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) de los E.E.U.U. de América. Estos cálculos de ángulos de posición solar están basados en las ecuaciones de Algoritmos Astronómicos de Jean Meeus (NOAA, s.f.). En la tabla 12 se muestran los valores de obtenidos de los cálculos para las imágenes digitales.

Tabla 12. Ángulos de azimut y elevación solar de las imágenes AHS y CASI para la fecha 02-06-2011.

Archivo	Hora	Azimut Solar	Elevación Solar
110602_P01	12:50	207,89	71,61
110602_P02	12:42	202,28	72,25
110602_P03	12:33	195,67	72,84
110602_P04	12:25	189,48	73,15
110602_P05	12:16	182,33	73,35
110602_P06	11:56	166,42	72,95
110602_P07	11:48	160,39	72,53
110602_P08	11:39	154,03	71,83
110602_P11	10:49	126,53	65,45
110602_P12	10:59	130,89	67,00
110602_P13	11:16	139,5	69,37
110602_P14	11:08	135,41	68,30

El MDT es un archivo con los datos de elevación del terreno con una resolución espacial de 5mx5m y se encuentran proyectados en coordenadas UTM zona 30 y datum WGS 1984, y es necesario que la imagen digital abarque la zona de las imágenes digitales. Estos datos provienen del PNOA del Instituto Geográfico Nacional.

Figura 31. Diagrama de flujo del algoritmo "Topographic Normalize" del programa ERDAS.

El comando "Topographic Normalize" del programa ERDAS ejecuta el modelo de normalización Lambertiano con la información recolectada anteriormente. En la figura 31, se aprecian los datos de entradas (azimut solar, elevación solar, ráster de elevación

MDT, y la imagen digital), que son procesados, según las ecuaciones descritas en el apartado 3.4.3, para obtener la imagen normalizada.

El producto final consiste en imágenes digitales donde el efecto del relieve se ve reducido, así como también los efectos mencionados anteriormente. Las imágenes están expresadas en unidades de reflectancia multiplicadas por un factor de diez mil.

6.1.4. Verificación de las correcciones radiométricas.

El trabajo realizado por Bustamante, J. et al. (2015), comprueba las correcciones atmosféricas de imágenes aeroportadas hiperespectrales calculando los valores de: el coeficiente de correlación de Pearson, la distancia euclidiana y la distancia angular con SAM⁵ (spectral angel mapper). En esta investigación, se propone realizar esta comprobación mediante el cálculo y análisis del coeficiente de correlación Pearson y la distancia euclidiana, una vez hechas todas las correcciones radiométricas.

El coeficiente de correlación de Pearson (r) es una medida de la relación lineal entre dos variables aleatorias cuantitativas y es independiente de la escala de medida de las variables (Peña, D., 2008). El coeficiente viene dado por la siguiente expresión:

$$r = \frac{1}{n-1} \sum \frac{(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{S_x S_y}$$

Donde r es el coeficiente de correlación, n el número de pares de datos, $\bar{x}$ e $\bar{y}$ son las medias de la muestra, S_x y S_y son las desviaciones estándar, y x e y son los elementos de las series de datos. Su utilidad radica en que mide el grado de relación entre dos variables siempre y cuando ambas sean cuantitativas.

La distancia euclidiana se define como la distancia ordinaria o en línea recta entre dos puntos en un espacio euclídeo. La distancia entre dos puntos se calcula como el equivalente al valor de la hipotenusa de un triángulo rectángulo. El programa R hace una

⁵ Método de clasificación espectral que usa un ángulo n-D para comparar píxeles respecto a una FER. El algoritmo determina la similitud espectral entre dos firmas calculando el ángulo entre las firmas y tratándolos como vectores en un espacio de dimensiones equivalentes al número de bandas. Los ángulos pequeños representan una coincidencia cercana entre el píxel y la FER (Kruse, F.A., 1993).

adaptación de la función para calcular la distancia entre las filas de una matriz de datos.

La función que define la relación viene dada por:

$$d = \sqrt{\sum (X_{\lambda} - Y_{\lambda})^2}$$

Donde d es la distancia y, en este estudio, λ es la longitud de onda, X equivale al valor de reflectancia de un píxel de la imagen e Y equivale a la reflectancia de la FER. Se propone utilizar el software estadístico R⁶ para determinar ambos indicadores. El procedimiento consiste en comparar los píxeles asociados a la zona de adquisición de FER con las firmas espectrales obtenidas en campo, mediante las operaciones que determinan el coeficiente de correlación de Pearson y la distancia euclidiana.

Los indicadores obtenidos permiten decidir el método de corrección atmosférica que resulta más apropiado. El valor de distancia euclidiana se considera como primer criterio de decisión, ya que determina la proximidad de la reflectancia entre una FER y los valores de reflectancia de un píxel. Luego, como segundo criterio, se considera el coeficiente de correlación de Pearson, porque evalúa la similitud de la forma entre las firmas espectrales.

6.2. Análisis de las imágenes hiperespectrales.

Como primer paso se propone el análisis de los datos a partir del conocimiento de propiedades de la cobertura terrestre que se quieran detectar e identificar.

Existen diversas formas de abordar el tratamiento de los datos hiperespectrales. Un enfoque consiste en el analizar el conjunto de las bandas espectrales que componen la imagen; mientras que el otro consiste en identificar o seleccionar aquellas bandas que resulten más convenientes para un caso concreto, y descartar aquellas que no sean relevantes.

⁶ Software libre para realizar cálculos estadísticos (modelos lineales y no lineales, pruebas estadísticas clásicas, entre otros) y técnicas gráficas (R Core Team, 2013).

Los objetivos propuestos y las informaciones previas sobre la cobertura terrestre definen el enfoque que se debe seguir. En la figura 32, se aprecia algunas de las interrogantes a resolver, al plantear un análisis de imágenes hiperespectrales.

Figura 32. Árbol de decisión para analizar imágenes hiperespectrales.

A partir de la validación del procedimiento descrito, éste se puede proponer como una técnica fiable para la monitorización de CO₂ en zonas de almacenamiento geológico. A continuación, se describen brevemente los procedimientos y las técnicas de análisis aplicadas en esta investigación.

6.2.1. Definición de los elementos a detectar.

Las emisiones de gases en Campo de Calatrava, como se ha definido anteriormente, constituyen análogos naturales del tipo de fugas que se podrían generar en un emplazamiento de almacenamiento geológico. En el estudio de los análogos naturales de emisiones de CO₂, diferentes elementos convergen en un mismo lugar. Estos sistemas están compuestos por una fuente de emisión, una posible fuente de agua y por la vegetación circundante, que según las características descritas en el apartado 5.4, permiten clasificar los sistemas en húmedos o secos.

En principio, cabe pensar que la opción idónea sería la detección directa del CO₂. Este planteamiento se apoya en el conocimiento de las zonas de fuerte absorción espectral (1.600, 1.400 y 2.000 nm) por parte del gas. Además de que existen firmas espectrales de diferentes elementos de los análogos naturales. No obstante se considera poco probable de aplicar debido al volumen bajo de las emisiones de CO₂ en la zona de

estudio (ver tabla 2), por lo que se hace poco factible aplicar la teledetección directa del gas.

Dadas las condiciones descritas, se hizo el planteamiento de detectar los elementos distintos al gas, es decir, la vegetación y la presencia o no de cuerpos de agua. Asimismo, otro factor que permitiría la detección sería como se distribuyen estos elementos en torno a una fuga. Esta consideración se denomina la detección/observación indirecta, ya que se pretende identificar emisiones de CO₂ a través de elementos distintos a este.

Los análogos naturales identificados en los trabajos de Elío, J. (2015) y Gutiérrez del Olmo, J. (2015), se han seleccionado como referencia para la detección indirecta. En la tabla 13 se presenta una relación de ellos.

Tabla 13. Ubicación de los análogos naturales en los trabajos de Elío, J (2015) y Gutiérrez del Olmo, J. (2015).

Análogo Natural	Clasificación según Gutiérrez del Olmo, J. (2015).	Coordenadas UTM	
		Este	Norte
Barranco Pequeño	Húmedo	429.359	4.294.463
Baño Chico	Húmedo	428.702	4.295.187
La Sima	Seco	434.416	4.297.240
Punto 14	Húmedo	425.936	4.298.247

En este orden de ideas, las características espectrales de los análogos naturales se utilizaron para detectar posibles emisiones de gas. A partir de este punto se determinan aquellas zonas del EEM en las cuales existen respuestas propias de los elementos de los análogos naturales, para su posterior evaluación “in situ”.

6.2.2. Selección de las imágenes según sus características espaciales y espectrales.

La vegetación, el suelo y el agua tienen una respuesta espectral determinada y específica de reflectancia debida a los materiales que los componen. Por ello como primer objetivo, se plantea determinar cuáles son las bandas espectrales a utilizar y, en caso contrario, si se requiere analizar todas las bandas espectrales ofrecidas por las imágenes.

En los estudios de vegetación, generalmente se emplean las bandas espectrales pertenecientes a las zonas del rojo visible y el infrarrojo cercano, ya que manifiestan

respuestas propias en zonas del EEM. Mientras que las bandas ubicadas en otras zonas del EEM resultan menos relevantes para estos estudios. Pese a que los suelos tienen un comportamiento menos diferenciado en las zonas del EEM es posible distinguirlos de la vegetación o el agua. El análisis de la respuesta espectral del agua se basa en la absorción de la gran mayoría de radiaciones en las regiones del EEM visible e infrarrojos, exceptuando la zona del azul visible. Este comportamiento del espectro respecto del agua tiene variantes cuando hay otros elementos presentes en el agua, tales como sedimentos, algas, entre otros.

Estas consideraciones sobre las bandas a utilizar plantean la necesidad de analizar las imágenes que son más apropiadas en la investigación. Entre las consideraciones a tener en cuenta para seleccionar las imágenes destacan las características de resolución espacial y espectral de las mismas (ver apartado 3.1).

6.2.3. Elección de la técnica de procesamiento.

Basados en las referencias bibliográficas y antecedentes mencionados en los capítulos 2 y 3, y los objetivos del estudio, existen varios planteamientos a considerar. Por un lado se planteó la reclasificación directa de las imágenes a través de las FER, en contraste con la transformación de los datos, mediante técnicas estadísticas, y la selección de algunas bandas espectrales. La diferencia fundamental radica en contemplar el uso de toda la información espectral de una imagen o solo una parte de ella.

El primer planteamiento consiste en analizar todas las bandas espectrales con la técnica de las correlaciones cruzadas, a través de la comparación de las FER con las imágenes hiperespectrales (Van der Meer, F., 1997). Este método calcula una serie de parámetros que permiten identificar en la imagen, a través de una composición en falso color, cualquier píxel que comparta similitudes del comportamiento espectral de las firmas obtenidas en los análogos naturales.

El segundo planteamiento se sustenta en la selección automatizada de bandas espectrales, por medio del Análisis de Componentes Principales (ACP) (Jolliffe, I.T., 2002), bajo el criterio de contener la mayor variabilidad en los datos espectrales. Entre las bandas espectrales de la imagen original, que el ACP señala como poseedoras de la

mayor variabilidad, se construyen ratios de bandas. Los ratios realzan las relaciones entre los datos de las bandas. Luego los valores de los ratios, en los píxeles que representan los análogos naturales, se utilizan para reclasificar la imagen e identificar cualquier otro píxel similar a estos.

El uso de software especializado (ISATIS, ERDAS o ENVI) permite un procesamiento de imágenes apropiado, además de facilitar la automatización de partes del proceso de monitorización. Los dos planteamientos se detallarán en los apartados 6.3 y 6.4, como dos propuestas de análisis de imágenes.

6.2.4. Uso de datos e información auxiliar de apoyo a las imágenes.

La teledetección se apoya considerablemente en otras fuentes de información que refuerzan las interpretaciones de los datos adquiridos. Ambas propuestas coinciden en que, una vez analizados los datos, estos se apoyan en la información auxiliar asociada a las emisiones de gases. Los datos de este estudio corresponden a las mediciones en campo de flujos de CO₂ (ver apartado 5.5) y a la cartografía temática geológica (ver apartado 5.4).

6.2.5. Producto de salida.

Como resultado del análisis de imágenes hiperespectrales AHS, mediante los planteamientos elaborados en los apartados 6.2.3, se obtienen imágenes reclasificadas que señalan la posibilidad de albergar emisiones de fugas de CO₂. Las zonas identificadas constituyen la base de posteriores trabajos de investigación que permitan confirmar y cuantificar las emisiones.

6.3. Propuesta A: Análisis de todas las bandas espectrales y aplicación de las correlaciones cruzadas.

La técnica de la comparación espectral por correlogramas cruzados (CCSM) es propuesta para la identificación de puntos de emanación de CO₂, debido a que sirve para identificar píxeles basado en el uso de firma espectral (Van der Meer, F., 1997). La CCSM, empleada en cartografía mineralógica, calcula el correlograma cruzado entre una FER y una firma espectral de prueba (FEP). El segundo corresponde a un píxel de una imagen digital y así obtener una clasificación de este (De Jong, S., 2004).

$$r_m = \frac{n\sum\lambda_r\lambda_t - \sum\lambda_r\lambda_t}{\sqrt{[n\sum\lambda_r^2 - (\sum\lambda_r)^2][n\sum\lambda_t^2 - (\sum\lambda_t)^2]}}$$

La correlación cruzada es equivalente al coeficiente de correlación lineal entre la FEP (λ_t) y la FER (λ_r), en una posición m (siendo $m=0$, los datos de cada firma espectral están apareados sin ningún desplazamiento), definido como el cociente entre la covarianza y el producto de la suma de las desviaciones estándar de cada serie de datos, donde n es el número de posiciones superpuestas.

Figura 33. Diagrama de construcción del correlograma cruzado. Los cuadros equivalen a un valor de reflectividad de FER (verde) y FEP (rojo). Los cuadros amarillos indican que el valor se utilizó para el cálculo.

Un correlograma cruzado se elabora al calcular la correlación cruzada en cada posición m , equivalente al desplazamiento de la FER respecto a la FEP hasta un número

determinado por el usuario menor o igual que el número de bandas comparadas en las firmas. Es decir, si las firmas espectrales contienen 50 bandas espectrales, m equivaldría a 50 y el correlograma estaría compuesto por 50 puntos.

El correlograma cruzado de una comparación ideal sería una parábola con su centro en la posición central ($m=0$) con un pico de correlación igual a uno (autocorrelación de la FER), las desviaciones de esta forma indican una cobertura distinta respecto a la evaluada ésta (De Jong, S., 2004).

La oblicuidad o skewness es un parámetro que evalúa la similitud entre la forma del correlograma. Los valores bajos y cercanos a cero hacen referencias a correlogramas simétricos y más parecidos a la FER en evaluación. El parámetro viene dado por la siguiente relación:

$$skewness = 1 - \frac{|r_{m=n} - r_{m=-n}|}{2}$$

Donde r_m equivale al coeficiente de correlación a una posición m específica. En la propuesta se tomaron 3 valores r_m equidistantes, siendo $n = 8:10$ y $-n = -10:-8$. Estos se promediaron y aplicaron como dos términos en la ecuación anterior.

El último parámetro que se considera para mejorar la comparación espectral, consiste en la significancia estadística del coeficiente de correlación cruzada, que se puede evaluar con la prueba de la t de student.

Figura 34. Detección de análogos naturales de CO₂ mediante correlogramas cruzados.

Los valores obtenidos del algoritmo anterior se procesan en el software ArcGIS para generar imágenes reclasificadas. Antes de realizar la reclasificación, los valores se reescalan entre cero y uno, para que tengan la misma ponderación en la nueva imagen. La técnica de combinación en falso color se utiliza para resaltar aquellos píxeles donde

existe una mayor similitud entre la FER y la FEP, cuyos valores se organizan de la siguiente manera:

- El valor rojo (R) corresponde al coeficiente de correlación en el punto de comparación cero $r_m = 0$.
- El valor verde (G) corresponde la oblicuidad, cuyos valores se invirtieron haciendo que los valores menores correspondan a 1 y los mayores a 0.
- El valor azul (B) corresponde a la significancia estadística.

Dado que es necesario el procesamiento de un volumen elevado de información, es necesario utilizar procedimientos automatizados. Para la determinación de las correlaciones cruzadas se ha utilizado el paquete estadístico R.

Posteriormente, los datos se compararán con otros como mediciones de flujos de CO₂, fotografías aéreas y observaciones en campo, a fin de corroborar la eficiencia del procedimiento estadístico y su utilidad para identificar los análogos naturales de la zona.

6.4. Propuesta B: Selección de bandas por Análisis de Componentes Principales y elaboración de ratios entre Bandas.

El elevado volumen de información ligada a las imágenes hiperespectrales puede dificultar el análisis de los datos. Es por ello que se requieren metodologías que permitan reducir el volumen de información sin pérdida de capacidad de análisis.

Entre estas metodologías de reducción de volumen de información se encuentra el ACP. Esta técnica permite transformar los datos mediante una rotación ortogonal de los ejes de coordenadas, para dar valores relativos basados en nuevos ejes. Mediante la matriz de covarianza de los datos, se calculan los autovectores y autovalores (eigenvectores y eigenvalores), los cuales son utilizados para reducir las dimensiones de los datos en las componentes que representan el mayor porcentaje de la varianza. Cada banda espectral tiene una relevancia dentro de una componente, definida por el autovector. Normalmente la primera componente aglutina la mayor cantidad de varianza de los datos y por lo tanto el autovalor más elevado (Jolliffe, F., 2002).

Figura 35. Procedimiento de análisis de imágenes hiperespectrales basado en Análisis de Componentes Principales y ratio entre bandas.

En estas componentes se identifican aquellas bandas espectrales con mayor peso en la varianza de los datos. Las primeras componentes contienen valores que, en la mayoría de los casos, diferencian claramente coberturas predominantes en la imagen. Por ejemplo, en una escena de una zona agrícola, destacan los suelos descubiertos y la vegetación natural o cultivos. Sucesivamente, las demás componentes muestran diferencias entre otros elementos de la cobertura terrestre menos abundantes y sus autovalores disminuyen. Las últimas componentes se visualizan sin un orden o relación particular, señalando indicios de ruido. Debido a que las primeras componentes

contienen la mayor cantidad de datos, se presume que dentro de estos se encuentren píxeles asociados a los análogos naturales, que se distingan del resto de coberturas.

Las operaciones aritméticas entre bandas espectrales permiten generar información y resaltarla visualmente. Una forma de relacionar estas bandas consiste en la aplicación de cocientes entre bandas, el cual es un procedimiento ampliamente utilizado en teledetección. Esta herramienta emplea el conocimiento que se tiene sobre el comportamiento espectral de las coberturas terrestres y las diferencias entre estas, aplicando un cociente entre dos o más bandas (Sobrinho, J., 2000). El procedimiento genera nuevos valores en los que se exaltan las diferencias existentes dentro de una misma o varias coberturas.

Figura 36. Procedimiento de reclasificación de imágenes a partir de ACP los valores obtenidos de este análisis sobre análogos naturales conocidos.

En el trabajo realizado por Feng, Q. et al. (2016), se aplicó la combinación de técnicas de ACP y de ratio entre bandas. Su objetivo fue identificar materiales y minerales en zonas de alteraciones hidrotermales (óxido de hierro, hidróxidos de Al y Mg, y la vegetación). Su investigación se basó en el uso de FER de estos materiales, obtenidas en laboratorio, y determinar las zonas en el EEM de reflectividad elevada y absorción de dichos materiales. Seguidamente elaboraron ratios entre las bandas representativas de cada mineral y aplicando la técnica de APC a los ratios obtenidos. En cada componente principal determinaron el autovector con mayor peso y así asociaron dicha componente al material o mineral correspondiente. Su metodología fue capaz de identificar

materiales o minerales, a la vez que minimizaron el efecto de otras coberturas abundantes como la vegetación.

En el caso de la presente investigación, los análogos naturales no presentan unas características claramente identificables en su firma espectral, por lo que se ha considerado que el procedimiento se aplicará de forma inversa a la propuesta de Feng, Q. et al. Es decir, que se utilizara primeramente el ACP para identificar las bandas que mayor contribución generan en las primeras componentes y después aplicar ratios sobre las bandas identificadas, con el fin de resaltar los elementos señalados.

El procedimiento propuesto consiste en:

1. Selección mediante del ACP de las bandas que se utilizarán, descartando aquellas bandas con muchas interferencias o ruido que no son posibles de enmendar.
2. Aplicación del ACP sobre las imágenes usando un software como ArcGIS o ENVI, para generar una nueva imagen con los nuevos componentes (bandas), así como la información estadística asociada. Estos programas, generalmente, ofrecen la opción de una vista preliminar de los autovalores de cada componente, expresados en tantos por cien de la sumatoria de todos los valores únicos. La nueva imagen puede incluir un número de componentes principales que totalicen aproximadamente el 90% de los valores únicos. Las componentes restantes representan el ruido presente en la imagen y se descartan.
3. Revisión de la composición de las componentes principales que tienen mayor variabilidad en los datos y selección de las dos primeras bandas espectrales que generen la mayor contribución a la varianza en cada componente, con base en la mayor longitud del autovector.
4. Elaboración de los ratios con las bandas identificadas en el punto 3.
5. Obtención de una imagen compuesta a partir de los ratios que permita identificar las zonas con posibles emanaciones de CO₂. En el siguiente esquema (figura 36), se presentan los pasos a seguir para obtener la imagen final.

A partir de los valores de los ratios, correspondientes a los píxeles de los análogos naturales conocidos, se establecieron los criterios de reclasificación que indiquen la posibilidad de emisiones de CO₂. La máxima posibilidad de emisiones se determina

según el rango de valores de los ratios obtenidos en los análogos naturales. Por lo tanto, a medida que el ratio de un píxel se aleje de estos valores, las posibilidades de emisiones disminuyen.

A efectos de simplificar los resultados, para cada ratio se elabora una imagen reclasificada de números enteros con tres rangos de datos, expresando tres niveles de posibilidad (alta = 2, media = 1, baja = 0) respectivamente. Luego se realiza una sumatoria de las tres imágenes reclasificadas, para generar una imagen con valores desde 0 hasta 6, señalando las zonas que pueden tener bajas y altas posibilidades respectivamente. Este paso se describe en la figura 37.

Figura 37. Proceso para generar mapas a partir de los valores de ratios de los análogos naturales (AN) conocidos.

Las zonas señaladas se verifican en campo mediante la observación directa y la medición in situ de concentraciones de CO₂. En este estudio se utiliza un detector de CO₂ (Anexo 7 .Características del detector Telair).

CAPÍTULO 7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Tras definir los objetivos del estudio, presentar los materiales y datos y realizar las propuestas metodológicas, en este capítulo se va a presenta y discute la aplicación de dicha metodología a la zona objeto de estudio. La evaluación de cada propuesta y los resultados obtenidos de éstas constituirán la base para proponer técnicas de aplicación de la teledetección a la monitorización de fugas en emplazamientos de CO₂.

La teledetección sostiene el carácter exploratorio de las propuestas, por la capacidad que tiene de abarcar grandes extensiones de superficie en periodos de tiempo cortos y a unos costos razonables. Los datos obtenidos por teledetección de los elementos de interés para los objetivos definidos dependerán del tipo de instrumentos utilizados. Por este motivo, la investigación ha permitido determinar qué aspectos, características y propiedades resultan relevantes en la detección de indicios de fugas basados en análogos naturales conocidos.

Las acciones a llevar a cabo se fundamentan en las relaciones entre las imágenes hiperespectrales y las fuentes de información asociadas a la identificación de indicios de fugas de CO₂. Es decir, se identifican las estructuras geológicas más relevantes de la zona (fallas, relieve, composición), los ecosistemas con sus elementos más propensos a sufrir alteraciones, como la vegetación. La caracterización de estos elementos resulta imprescindible en un emplazamiento de almacenamiento geológico. Los estudios de línea base⁷ facilitan datos sobre el punto de partida del entorno y permite la futura comparación, una vez que se inicien las actividades de inyección de CO₂.

En este capítulo se describen y mencionan los resultados obtenidos del tratamiento previo de las imágenes digitales a través de las correcciones radiométricas; así como de la aplicación de las propuestas metodológicas señalando las ventajas y desventajas de cada una; y por último se presentan los productos generados de cada propuesta relativos a la detección de indicios de emisión de CO₂. En base a los resultados obtenidos se proponen una serie de pautas para la monitorización de los emplazamientos de

⁷ Estudio que identifica y determina el estado en equilibrio de los elementos y procesos más relevantes de un sistema. En las ciencias de medio ambiente, este estudio se utiliza como punto de partida para medir los cambios que suceden en un ecosistema debido a una actividad o impacto.

almacenamiento geológico de CO₂, que sirvan como base para el diseño de una estrategia basada en la teledetección.

7.1. Correcciones radiométricas de las imágenes AHS Y CASI 1500.

Tras recibir las imágenes digitales de los sensores AHS y CASI 1500, se les aplicó una serie de procedimientos descritos en la figura 30, del capítulo 6. Estas correcciones permiten obtener información más cercana a la verdad terreno. Las correcciones radiométricas aplicadas a las imágenes transforman los valores de radiancia en reflectividad. Además estos procedimientos permiten eliminar la mayoría de las interferencias externas que alteran los valores de reflectancia en el terreno.

La corrección geométrica se realizó utilizando el paquete ENVI, ya que el formato inicial (.raw) de las imágenes es compatible con este programa. Seguidamente se realizó la corrección atmosférica con el mismo programa, ya que ofrece módulos automatizados para tal fin (ver apartado 6.1.2). Por último, se ha empleado el programa ERDAS para realizar la corrección topográfica, ya que a diferencia de otros, incluye un algoritmo para ese objetivo.

La efectividad de las correcciones se comprobó con las FER obtenidas en campo, por medio de indicadores estadísticos. Los indicadores determinaron el nivel de ajuste entre dichas firmas y las FEP pertenecientes a aquellos píxeles asociados a las localizaciones donde se obtuvieron las FER. A continuación se mencionan los resultados más relevantes de las correcciones radiométricas.

7.1.1. Corrección geométrica.

Se han utilizado los comandos automatizados del programa ENVI para realizar la corrección geométrica, que permitieron determinar la correcta localización de los píxeles de las imágenes. La información necesaria para la corrección espacial se adquirió por medio de los sistemas de determinación de actitud y posicionamiento embarcados a bordo de la plataforma de transporte durante la adquisición de las imágenes realizada por el INTA (ver apartado 5.1).

En la figura 38 se aprecian los cambios en la imagen corregida (b) respecto a la original (a), siendo las carreteras y la delimitación de las tierras agrícolas unos ejemplos notables (señalados con las elipses rojas). En el caso de las carreteras, la corrección se debe a que en la realidad estas tienen un trazado recto con algunas curvaturas, no obstante en la imagen original (a) se aprecian pocos segmentos rectos. En el segundo caso, ocurre que algunas delimitaciones de terreno son rectas, pero en la imagen original no se apreciaba esta situación.

Figura 38. Corrección de distorsiones geográficas en la imagen P01BD del sensor AHS. (a) Imagen original. (b) Imagen después de aplicar la corrección geométrica.

La ubicación espacial correcta de las imágenes es imprescindible para la investigación, ya que permite relacionar los datos espectrales con los análogos naturales conocidos. Así como también para la correcta localización de indicios de fugas de CO₂ con localizaciones definidas en la investigación. La efectividad de las correcciones se evaluó mediante la comparación de las imágenes con las ortofotos de la zona de estudio generadas por el PNOA (ver apartado 5.3).

El error total RMS de la georreferenciación fue aproximadamente de 1,5 m, lo que se traduce en una imprecisión menor a un pixel, en el caso de las imágenes del sensor AHS de vuelo bajo. Mientras que en las imágenes del sensor CASI 1500i de vuelo bajo, el error fue de 0,3m, lo que también es equivalente a un desplazamiento menor a un pixel. Los ficheros generados son la base para realizar las siguientes correcciones.

7.1.2. Corrección atmosférica.

Las correcciones atmosféricas aplicadas arrojaron resultados diferentes debido a la naturaleza de cada método. El método QUAC se basa en la obtención de datos de compensación atmosférica dentro de la misma imagen. Por otro lado, el método FLAASH, basado en el código MODTRAN, realiza las correcciones según modelos físicos de las propiedades de la atmósfera y las condiciones atmosféricas del momento de adquisición de las imágenes (ver apartado 6.1.2).

El método QUAC resultó más simple de aplicar, porque las operaciones del programa ENVI para ejecutar este módulo solo requieren cargar la imagen hiperespectral. El algoritmo se encarga de obtener la información de la misma imagen, tal como se describe en el apartado 6.1.2. En cambio el método FLAASH requiere de datos más específicos solicitados por el código MODTRAN, tales como: el tipo de atmósfera, fecha y hora de adquisición de la imagen, coordenadas del centro de la imagen, banda espectral para calcular la columna de agua, entre otros.

Aplicando cualquiera de los dos algoritmos se genera una nueva imagen, donde los valores de reflectancia obtenidos están expresados en un factor de 10000. Normalmente estos valores se expresan en tantos por ciento pero, a efectos de hacer operaciones en los programas, los mismos se mantuvieron expresados como el factor anterior.

Figura 39. Firma espectral de suelo (verde) en radiancia $\mu\text{w cm}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$. Firma espectral después de aplicar método de corrección atmosférica, en expresado en reflectancia: (rojo) FLAASH y (azul) QUAC.

En las figuras 39 y 40 se aprecian los cambios generados en la firma espectral de los píxeles tras la corrección atmosférica. Se seleccionaron dos píxeles, uno de suelo (E

429.940 y N 4.301.154) y otro de vegetación (E 429.960 N 4.301.134 de la imagen AHS P04BD. La curva verde representa la radiancia espectral registrada en el sensor. Las curvas roja y azul, representan la reflectancia después de aplicar los métodos FLAASH y QUAC, respectivamente.

Figura 40. Firma espectral de vegetación (verde) en radiancia $\mu\text{W cm}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$. Firma espectral después de aplicar método de corrección atmosférica, en expresado en reflectancia: (rojo) FLAASH y (azul) QUAC.

En el caso del píxel de vegetación, las curvas tienen las características particulares de la firma espectral de cualquier planta en un estado saludable y verde, reflejado en el leve pico en la zona del visible verde ($0,5 - 0,6 \mu\text{m}$), una depresión en la zona del visible rojo ($0,6 - 0,7 \mu\text{m}$) y una alta energía reflejada en el infrarrojo cercano ($0,7 - 0,9 \mu\text{m}$). En el píxel de suelo, los métodos suavizan la curva de la radiancia y se ajusta a la firma esperada de un suelo.

En esta investigación se planteó corregir las imágenes con ambos métodos y elegir aquel que mejores aproximaciones hiciera respecto a las FER. No obstante, la corrección se realizó solo en las imágenes AHS, ya que las imágenes CASI 1500i del vuelo bajo no cubren la totalidad de la zona de estudio (ver anexo 1). Es destacable que los métodos hacen aproximaciones de la radiancia diferentes, de acuerdo al tipo de cobertura. La vegetación suele tener un ajuste mejor con el método QUAC, mientras que el método FLAASH tiende a ser más sensible a los contenidos de humedad y puede hacer compensaciones que sobreestiman los valores de reflectividad de algunos píxeles.

7.1.3. Corrección topográfica.

Para realizar la corrección topográfica se ha utilizado el algoritmo topographic normalize (apartado 6.1.3) incluido en el programa ERDAS. Este algoritmo permite efectuar la normalización de reflectancia por los efectos topográficos. Este proceso requiere los datos de los ángulos azimutales y de elevación solar para cada imagen digital, los cuales han sido calculados previamente (ver tabla 10); así como también el uso de un modelo digital del terreno de la zona del Instituto Geográfico Nacional (anexo 4).

Figura 41. Cuantificación del ajuste sobre la reflectividad de la imagen AHS P04BD, de acuerdo a la corrección topográfica en una zona de colinas de Campo de Calatrava.

Los efectos causados por el relieve de la superficie fueron compensados por las correcciones topográficas, a través del cálculo de valores que cambian la radiancia recibida por el sensor, según la orientación cardinal y de pendiente de un píxel. El ajuste viene dado por un aumento o disminución de su reflectancia en cada banda.

En la figura 41, se observa una imagen producto de la diferencia entre los rásteres obtenidos de la corrección atmosférica y la corrección topográfica. Esta figura refleja la magnitud del cambio que genera la corrección topográfica. En aquellas zonas donde los valores son positivos (blanco) se produce un aumento de la reflectividad, mientras que los valores negativos (negro) representan una disminución. Basado en este argumento, las zonas orientadas al norte y que presentan mayor pendiente reciben una compensación positiva porque reciben menos luz solar que las zonas orientadas hacia el sur.

La variación de la nueva imagen digital, respecto a la imagen procedente de la corrección atmosférica, es aproximadamente de un 5% o menor. Este rango de variación indica que se han minimizado los efectos asociados al relieve al momento de la adquisición de las imágenes. La fecha elegida favoreció que el sol se ubicara lo más próximo posible a un ángulo cenital de la superficie para la latitud de la zona de estudio. Como resultado de la aplicación de esta corrección, los valores de reflectancia de las imágenes se acercan a la realidad del terreno.

La imagen digital obtenida, tras finalizar este último proceso, acumula todos los ajustes producto de las correcciones radiométricas, constituyendo así la base para el análisis posterior. En el anexo 8 se presentan las imágenes con corrección radiométrica P01BD-P08BD del sensor AHS.

7.1.4. Verificación de las imágenes corregidas según indicadores estadísticos calculados a partir de las firmas espectrales de referencia.

La evaluación de las correcciones radiométricas mediante datos obtenidos en campo, representaron un enfoque adecuado para determinar las propiedades espectrales de las imágenes y su efectividad para alcanzar los objetivos de esta investigación. Para ello se compararon los valores de las imágenes con los valores de reflectividad medidos in situ con un espectrorradiómetro de campo, mediante los métodos explicados en el apartado 6.1.4.

Para el cálculo de las correlaciones se utilizó el paquete R. En la figura 42, se presentan distintos tipos de coberturas terrestres presentes en el campo de Calatrava durante el proceso de adquisición de las FER con el espectrorradiómetro de campo. En la tabla 11 del apartado 5.2.3 se listan las firmas recolectadas y sus coordenadas y, de forma análoga, en la figura 43 se presenta en detalle la ubicación de algunas de las FER analizadas sobre las imágenes digitales.

Antes de realizar el cálculo de los indicadores, se determinó en las imágenes digitales las ubicaciones de cada punto de adquisición de una FER. A pesar de que el punto cabe en un píxel, se decidió elegir varios de ellos situados alrededor de las coordenadas de estos, formando así una cuadrícula de 6x6 evitando la exclusión del píxel de la ubicación. Tras

identificar los píxeles se elaboraron ficheros con los datos de las FEP asociados a esa ubicación, para aplicar los cálculos entre cada FEP y la FER. Los valores elevados de correlación de Pearson y bajos de distancia euclidiana señalan que esa FEP corresponde a la cobertura de la FER que se evaluó.

Figura 42. Adquisición de firmas espectrales de referencia en campo. Coberturas a: cebada, b: olivo, c: carrizo en barranco pequeño, d: quercus, e: suelo desnudo 1, f: pastizal, g: sima alta, h: almendro, i: piscina.

Tabla 14. Indicadores de las correcciones radiométricas (correlación de Pearson y distancia euclidiana) de las imágenes AHS respecto a las FER, diferenciados por los métodos de corrección atmosférica.

Cobertura de firma espectral	Imagen	Corrección atmosférica	Correlación Pearson			Distancia Euclidiana		
			1	2	3	1	2	3
Almendro	P06BD	QUAC	0,982	0,96	0,975	1828,85	2485,51	3019,22
		FLAASH	0,954	0,978	0,966	2749,32	2804,39	3289,24
Cebada	P06BD	QUAC	0,949	0,947	0,925	1220,37	1284,93	1351,52
		FLAASH	0,974	0,961	0,962	4262,59	4265,78	4269,78
Coscoja	P06BD	QUAC	0,679	0,665	0,666	7237,39	7447,51	7467,71
		FLAASH	0,592	0,539	0,561	7806,38	8223,62	8388,33
Olivo	P06BD	QUAC	0,785	0,739	0,744	8586,21	9014,08	9288,19
		FLAASH	0,636	0,577	0,573	10960,3	11647	12399,7
Pastizal	P06BD	QUAC	0,872	0,867	0,914	2381,34	2574,53	2789,54
		FLAASH	0,892	0,861	0,872	3231,99	3924,27	4541,86
Quercus	P06BD	QUAC	0,983	0,987	0,988	2950,65	3164,34	3711,29
		FLAASH	0,979	0,982	0,978	2799,17	2891,99	3176,61
Tomillo	P06BD	QUAC	0,918	0,868	0,884	2124,27	3002,97	3468,83
		FLAASH	0,903	0,823	0,826	3438,30	4565,91	5221,44
Viñedo	P06BD	QUAC	0,889	0,889	0,920	11602,4	11664,6	11695,4
		FLAASH	0,831	0,831	0,852	10622,7	10666,5	10705,3
Suelo desnudo 01	P06BD	QUAC	0,915	0,873	0,901	3730,95	3777,01	3788,09
		FLAASH	0,936	0,929	0,936	2139,20	2163,72	2195,18
Suelo desnudo 02	P06BD	QUAC	0,900	0,917	0,865	2956,84	3285,04	3379,09
		FLAASH	0,935	0,948	0,892	5025,29	5541,86	5698,18
Suelo desnudo 05	P06BD	QUAC	0,837	0,831	0,822	3457,21	3477,65	3754,71
		FLAASH	0,901	0,872	0,823	3281,54	4046,58	4392,81
Suelo desnudo 06	P06BD	QUAC	0,918	0,904	0,882	2554,60	2756,49	2775,80
		FLAASH	0,917	0,909	0,909	4370,77	4448,44	4524,42
Agua Barranco Pequeño	P04BD	QUAC	0,954	0,862	0,879	4193,48	5594,88	5670,68
		FLAASH	0,871	0,863	0,699	2971,16	2974,69	3064,19
Carrizo Barranco Pequeño	P04BD	QUAC	0,996	0,992	0,995	4866,90	5139,74	5230,73
		FLAASH	0,991	0,992	0,993	3338,27	3340,62	3383,73
Piscina Barranco Pequeño	P04BD	QUAC	0,594	0,611	0,385	5822,76	8414,98	12887,8
		FLAASH	0,161	0,206	0,104	5554,96	7416,32	11264,2
Plantita y limo Barranco Pequeño	P04BD	QUAC	0,883	0,885	0,847	3352,35	3726,07	3740,58
		FLAASH	0,934	0,945	0,904	2062,29	2281,34	2484,22
Roca	P04BD	QUAC	0,846	0,809	0,723	4578,78	5046,47	5202,82
		FLAASH	0,879	0,909	0,890	3123,75	3212,21	3282,38
Liquen	P04BD	QUAC	0,769	0,685	6,651	4082,63	4351,06	4552,86
		FLAASH	0,633	0,652	0,598	5530,34	5631,64	5755,68
Sima 01	P07BD	QUAC	0,883	0,528	0,775	1875,73	2396,76	2434,77
		FLAASH	0,799	0,616	0,535	4431,88	4952,38	5132,88
Sima alta	P07BD	QUAC	0,719	0,719	0,686	4944,22	5208,21	5451,57
		FLAASH	0,899	0,869	0,854	2221,34	2576,64	2695,98
Sima vegetación	P07BD	QUAC	0,954	0,889	0,889	1699,78	2572,37	2586,15
		FLAASH	0,910	0,910	0,966	3632,66	3658,94	4025,27
Ulex vivo	P07BD	QUAC	0,989	0,984	0,983	1180,52	1197,02	1260,24
		FLAASH	0,935	0,935	0,948	2045,98	2067,83	2525,74
Ulex Muerto	P07BD	QUAC	0,428	0,353	0,344	4010,82	4201,43	4212,75
		FLAASH	0,594	0,508	0,515	4169,37	4464,74	4467,03

Los indicadores manifiestan que los valores de reflectividad de las imágenes se aproximan, de forma aceptable, a valores que se pueden esperar de coberturas conocidas, como las de vegetación y de suelo, según la FER utilizada. La tabla 14 describe los valores obtenidos de correlación Pearson y distancia euclidiana, para aquellos FEP localizados que mejor ajuste tuvieron cercanos al punto de adquisición de la FER.

Figura 43. Detalle de la zona de adquisición de la firma espectral de referencia de: a) almendro, b) quercus, c) suelo desnudo 01, d) cebada, e) viñedo, f) olivo, g) suelo desnudo 02. Escala 1:770

Los valores señalados en **negrita** indican el método de corrección atmosférica que mejores resultados ofreció, siendo el único proceso que era diferente en el preprocesamiento de las imágenes. Se consideró con mayor importancia la distancia que el coeficiente de correlación, debido a que el primero indica la semejanza con los valores de reflectancia.

En líneas generales, ambos métodos arrojaron resultados satisfactorios, ya que los valores de correlación fueron altos, por encima de 0,90 y cercanos a 1, en casi todas las localizaciones analizadas. Estos valores demostraron que las FEP tienen forma similar a las FER correspondientes. No obstante, los valores de distancia euclidiana, en valor absoluto, matizan estas correlaciones al indicar si aumentan o disminuyen los valores de reflectividad en la firma espectral de los píxeles. Los incrementos en la distancia se generan si aumenta la diferencia de los valores de reflectividad entre las firmas. La distancia euclidiana equivale a cero cuando las firmas son idénticas. Este caso no se presentó puesto que las firmas se obtuvieron por sensores diferentes y en condiciones distintas (las condiciones de resolución espacial, resolución espectral y altura fueron distintas).

El píxel con mayor correlación y menor distancia correspondió con la ubicación de la adquisición de las FER. En cambio aquellos que presentaron un menor ajuste estaban asociados a la misma cobertura, pero en zonas próximas al punto de adquisición de la FER. Las diferencias encontradas pueden referirse a la mezcla de coberturas, es decir, a que el sensor ha percibido radiancias de suelo desnudo, o vegetación cercana a un cuerpo de agua situado en las proximidades de la cobertura considerada. Con el fin de evitar este problema, la adquisición de la FER se realizó desde una elevación muy baja (entre 1 – 1,5 m) respecto a la parte superior de la cobertura. Salvo en algunas excepciones en las que resultaba muy difícil acceder a este punto, como es el caso de las copas de algunos árboles.

En la mayoría de coberturas, el píxel con valor alto de correlación Pearson y bajo de distancia euclidiana es el mismo para ambas imágenes con métodos de corrección atmosférica diferentes. No obstante, también se dieron casos en los que no eran coincidentes los píxeles, aunque si estaban adyacentes o cercanos (± 3 píxeles). Las compensaciones que realiza cada método de corrección atmosférica en los valores de reflectividad pudo ser la causa de esta diferencia.

7.1.4.1 Clasificación de las firmas espectrales de referencia.

La comparación de las FER con los FEP permitió deducir el comportamiento de algunos píxeles de acuerdo a la cobertura que representaba. Es por ello que las FER se agruparon en 5 grandes grupos, según su distribución, uniformidad y composición, de la siguiente manera:

- Vegetación dispersa alta
- Cobertura homogénea
- Cultivos leñosos de cobertura heterogénea
- Análogos naturales secos
- Análogos naturales húmedos

Esta clasificación se generó a partir de las características propias de las FER, pero también de la forma en la que se distribuyen en la imagen. La presencia de píxeles mezclados, representando varias coberturas, influyeron en el procedimiento de la

verificación y en la clasificación de la imagen. Por ello, consecuentemente, afectan en la señalización de indicios de fugas de CO₂.

Las zonas con una cobertura homogénea presentan mejores indicadores sobre los ajustes de píxeles con las FER. Este caso se presentó en las coberturas de cebada, suelos, y pastizales. Por el contrario en las coberturas más heterogéneas como en viñedo, olivo, coscoja y otros (ver figura 42), los indicadores son menos representativos. En este caso se aprecia que los indicadores señalan una relación menos ajustada a pesar de que los píxeles coinciden con las coordenadas de localización del punto de adquisición. A continuación se describen las características de cada grupo.

7.1.4.1.1. Vegetación dispersa alta.

Las FER que abarcan este grupo son: “Almendro”, “Coscoja” y “Quercus”, que representan especies vegetales de árboles leñosos. Los individuos de estas especies se caracterizan por estar presentes de forma dispersa por la zona, por su altura (superior a 3 m) y sus copas extensas, en relación al resto de vegetación, tanto cultivada así como de otras especies silvestres. Es por esta razón que en las imágenes hiperespectrales, estos árboles se identifican fácilmente ya que se representan por pequeños cúmulos de varios píxeles (entre 4 a 8) muy bien definidos. Las FER asociadas a estas coberturas identificaron fácilmente otros píxeles con las características similares, debido a la “uniformidad” de los píxeles asociados a estas especies.

La figura 44 ilustra gráficamente las FER de la zona asociada a la cobertura de la FER “Almendro”. Esta FER representa una muestra de una de las variedades de la especie *Prunus dulcis*, que tiene presencia en el campo de Calatrava. El ejemplar seleccionado está ubicado al lado de una vía pecuaria o caminos (ver figura 42 h) y consiste en un árbol de 5m de altura aproximadamente y una elevada densidad foliar. Los FER se representan en la imagen claramente como un píxel de este tipo de vegetación y tiene un buen ajuste con la FER. Cabe destacar que no se observaron plantaciones de esta especie.

Figura 44. Comparación de píxeles con corrección atmosférica (líneas de colores) con el método FLAASH (superior) y QUAC (inferior) respecto a la firma espectral “Almendro” (línea negra discontinua).

El método QUAC realizó un ajuste para un píxel, que se acerca considerablemente a la firma de referencia con un coeficiente de correlación de 0,982 y una distancia euclidiana de 1828,85, por lo que seguramente éste coincide con el punto donde se obtuvo la medición. De igual manera casi todas las firmas presentan la característica típica de la vegetación. Sin embargo muchos de estos píxeles que parecen de vegetación no presentan en el gráfico el valle característico de absorción en la zona del rojo visible, porque posiblemente dichos píxeles también representan una parte de suelo, originando una señal mezclada. Este efecto también se produce en el caso de la “Coscoja”, ya que los indicadores obtenidos para esta FER señalan poco ajuste.

7.1.4.1.2. Coberturas homogéneas.

Este grupo se clasifica, más que por su composición, por la homogeneidad de sus píxeles. En otras palabras, los píxeles no presentan mezclas de coberturas ni señalan características espectrales de materiales diferentes. Las FER que abarcan este grupo son las gramíneas silvestres (“Pastizal” y “Tomillo”) y el cereal “Cebada”, y también se incluyen las FER de los suelos descubiertos. El total de este grupo se caracteriza por agrupar zonas extensas y bien definidas con poca variabilidad en las firmas espectrales entre píxeles.

Figura 45. Comparación de píxeles con corrección atmosférica (líneas de colores) con el método FLAASH (superior) y QUAC (inferior) respecto a la firma espectral “suelo desnudo 1” (línea negra discontinua)

En las figuras 45 y 46 se aprecian varios ejemplos de FER, que a diferencia de la anterior de “Almendo”, se consideran homogéneas porque el grupo de píxeles son muy parecidos y no se produce la mezcla de píxeles.

Este es el caso de la cobertura “Suelo desnudo 01” (figura 29 e). Los indicadores obtenidos para este FER, con el método FLAASH (coeficientes de correlación Pearson = 0,936 y distancia euclidiana = 2139,2), señalaron un ajuste muy cercano con los FEP de la zona seleccionada en las imágenes. Además, con el método QUAC también fueron muy satisfactorios los indicadores obtenidos.

Figura 46. Comparación de píxeles con corrección atmosférica (líneas de colores) con el método FLAASH (superior) y QUAC (inferior) respecto a la firma espectral “Cebada” (línea negra discontinua).

La misma situación ocurrió con la cobertura “Cebada” (*Hordeum vulgare*), uno de los cultivos de cereales más extendidos en la región (figura 42 a). Su presencia en las imágenes es relativamente fácil de identificar porque presenta un color entre amarillo y dorado (en la época del año de adquisición de las imágenes), distinto a los suelos y a otras especies vegetales, además de encontrarse en formas de polígonos regulares correspondientes a la división de las tierras por parte de los agricultores. Los campos cultivados con cebada, representados en las imágenes, tienen un aspecto uniforme, ya que la forma de cultivo no deja espacios de suelo visible.

En ambos métodos de corrección atmosférica, las FEP de la figura 46 son muy parecidas entre si y realizan un ajuste espectral adecuado. Sin embargo, el método FLAASH realizó una sobreestimación de la reflectividad, muy diferente a lo que sucedió con el método QUAC, donde el ajuste fue más cercano sobre la FER. Cabe destacar que el coeficiente de correlación de Pearson (0,974) fue más alto con el método FLAASH, indicando que el ajuste realizado se acerca a la forma de la firma de referencia; pero la distancia euclidiana (1220,37) fue menor con el método QUAC, señalando que los valores de reflectividad de ese píxel tienen menos diferencia respecto a la referencia.

7.1.4.1.3. Cultivos leñosos de cobertura heterogénea.

Las FER que corresponden a este grupo son: “Viñedo”, correspondiente a las viñas (*Vitis vinifera*), y “Olivo” (*Olea europaea*). Su característica principal radica en que estas especies se distribuyen de forma regular sobre la zona, ya que son especies arbóreas cultivadas utilizadas en diversas actividades agroindustriales. Las FER de las muestras de plantas presentan claramente las características propias de la vegetación, lo cual es fácilmente observado utilizando el espectrorradiómetro de campo en el que la resolución es menor. En cambio los sensores con resolución espacial por encima de 1 m, no son capaces de discriminar y captan otras coberturas. Aquello píxeles de la imagen que representan coberturas de vegetación, en la mayoría de los casos, tienen similitud con la FER y los coeficientes de correlación son elevados.

A causa de las consideraciones anteriores, los ajustes y los indicadores no son tan satisfactorios como sucedió en los píxeles de las coberturas homogéneas o con los de vegetación dispersa. Un factor que influye notablemente en estos resultados es la

reflectividad en la zona del rojo visible y el infrarrojo cercano. Se ha detectado que, en los píxeles mezclados, los valores en la zona del rojo visible son superiores a los de las firmas de referencia, sugiriendo que se debe al aporte que realiza el suelo en esta zona del EEM.

Como se ha descrito anteriormente, posiblemente la percepción del sensor de varios tipos de cobertura en un solo píxel y factores externos como la forma de las plantas y el número de individuos por unidad de área generan la señal mixta. Esta situación se manifiesta en los olivares y viñedos, que son cultivos plantados de una forma específica. Las plantas están separadas por una distancia regular y los agricultores evitan la proliferación de otra vegetación en el suelo entre las plantas.

Además, hay que tener en cuenta que el desarrollo foliar de las plantas puede determinar cuan homogéneo puede ser un píxel. Las FER de este grupo se obtuvo de plantas de porte bajo (menos de 2 m de altura) y que no presentaban una densidad de hojas elevada, por lo que vistas desde nadir (al igual que el sensor aeroportado) se visualizan zonas de suelo descubierto entre sus hojas y ramas.

7.1.4.1.4. Análogos naturales secos.

Como se ha mencionado anteriormente en el apartado 5.4.2, estos puntos fueron de gran interés porque presentan emisiones de CO₂ constantes, el análogo natural considerado es aquel conocido como La Sima. Las FER incluidas en este grupo incluyen a: Sima 01, Sima alta, Sima vegetación, Ulex vivo y Ulex muerto. Las FER agrupadas son de distintas coberturas, por lo que el criterio de agrupación fue la ubicación. Estas FER se obtuvieron para intentar relacionar las emisiones de CO₂ con los elementos que componen el análogo natural.

Las FER Sima 01 y Sima alta fueron extraídas desde dos alturas, a 3,5m y 1,5 m respectivamente, sobre la misma área. Las características de esta localización han creado un sistema muy particular, porque en la zona cercana de la emisión de CO₂ -

“punto caliente” o “hotspot”⁸ de fuga hay poca presencia de vegetación, mientras que a mayor distancia de dicho punto habitan algunas especies de vegetales.

Figura 47. Comparación de píxeles con corrección atmosférica (líneas de colores) con el método FLAASH (superior) y QUAC (inferior) respecto a la firma espectral “Sima alta” 3,5m (línea negra discontinua) y “Sima 01” 1,5m (línea roja discontinua).

Era de esperar que en esta localización la FER “sima alta” (figura 42 g) estuviese más relacionada con los píxeles del área, que la firma obtenida a menor altura. Al ser obtenida esta FER a mayor altura, el sensor pudo recibir radiaciones de otras coberturas

⁸ Anglicismo utilizado para designar un punto de interés con una intensidad mayor que otras zonas sobre un fenómeno en particular.

presentes y generar una firma con propiedades de vegetación y suelo desnudo, tal como se manifiesta en los píxeles de la imagen.

La situación descrita se puede apreciar gráficamente en la figura 47 y en los valores de indicadores obtenidos. El método QUAC favorece el ajuste de los píxeles con la referencia “Sima 01” y el método FLAASH ajusta mejor los píxeles con la referencia “Sima alta”. La estimación de reflectividad levemente superior, realizada por el método FLAASH, favorece el ajuste con la referencia mencionada. Aunque cabe destacar el coeficiente de correlación fue más alto con dicha corrección (0.899) y el indicador de distancia con el método QUAC (1875.73).

Figura 48. Vegetación en estado normal y atrofiado del género Ulex cercano a La Sima.

Las observaciones en el campo ofrecen indicios sobre la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno en los alrededores de un punto de emisión. Cabe destacar que en La Sima se observó que algunos individuos de vegetación, por ejemplo del género Ulex, tenían un aspecto que indicaban que estos se encontraban muertos o atrofiados parcialmente (ver figura 48). Sin embargo, a distancias muy cortas (1m) habitaban otras plantas que a simple vista parecían normales y no presentaban alguna afectación visible. Por lo tanto, se obtuvieron FER de ambas plantas para intentar relacionar este aspecto con el punto de emisión de gases.

Los píxeles seleccionados presentaron características propias de la vegetación. A pesar de ello, se aprecia que los píxeles tienen valores de reflectividad superiores en la zona del rojo visible respecto a la referencia de “ulex vivo”. Los píxeles tampoco se ajustan a la recta que tiene la firma de referencia de “ulex muerto” en la zona visible y del infrarrojo (ver figura 49). Al ser las plantas menores de 2 m de circunferencia y 0,5 m de

altura, se presume que la reflectividad de los píxeles se debe a la mezcla de coberturas (ulex, otras gramíneas y suelos).

Figura 49. Comparación de píxeles con corrección atmosférica (líneas de colores) con el método QUAC respecto a la firma espectral “Ulex vivo” (superior) y “Ulex muerto” (inferior).

7.1.4.1.5. Análogos naturales húmedos.

Este grupo de FER está relacionado con el grupo anterior y abarca diversas coberturas, desde vegetación hasta suelos, pero se diferencia en que las emisiones están asociadas a la presencia de agua. Las características de los píxeles que representan estas coberturas son parecidas a las de la clasificación heterogénea, porque son propensos a

presentar píxeles con coberturas mezcladas. De la zona de Barranco Pequeño, se incluyeron las FER: “Agua BP”, “Carrizo BP”, “Piscina BP”, “Plantita y Limo BP”, “Roca” y “Liquen”. El criterio de clasificación también fue la localización, con la intención de relacionar estos elementos con las fugas de CO₂ presentes en las charcas, lo cual le otorga el nombre coloquial de “Hervidero”.

Figura 50. Comparación de píxeles con corrección atmosférica (líneas de colores) con el método FLAASH (superior) y QUAC (inferior) respecto a la firma espectral “Piscina BP” (línea negra discontinua).

De un hervidero conocido, ubicado en Barranco Pequeño, se obtuvo la FER “Piscina BP” (figura 42 i). La medición se realizó del agua contenida en un tanque donde emanan burbujas de CO₂ (determinado con el detector de CO₂ portátil [anexo 7]). A diferencia

de otros análogos naturales, este está contenido dentro de una estructura antrópica y no tiene vegetación alrededor.

Las FEP tienen propiedades y similitudes a la referencia “piscina” en la zona visible e infrarroja cercana del EEM (ver figura 50), pero a partir del infrarrojo, los píxeles tienen valores de reflectividad más elevados que la referencia (la mayor parte de la radiación es absorbida por las propiedades del agua). Esto fue debido a que los píxeles tienen datos del agua y también, posiblemente, de las paredes blancas de la estructura del tanque y sedimentos que puedan estar presentes en el agua. Por ello, los indicadores demuestran que el ajuste no es adecuado.

En la cobertura “Carrizo” (figura 42 c), que representa un análogo natural rodeado de vegetación y en su centro se observa una charca con burbujeo, ocurre todo lo contrario respecto a la zona de la FER “cebada”. En este caso se apreció que los valores de correlación fueron elevados para el método QUAC (0,996), pero los valores de distancia euclidiana fueron inferiores (3338,27) en aquellos píxeles donde se aplicó el método FLAASH. Estas diferencias se pueden atribuirse a que las FEP proceden de dos imágenes AHS distintas.

7.1.5. Consideraciones sobre verificación de las imágenes corregidas.

En la mayoría de casos se observa que la FEP se ajusta adecuadamente a la forma de la FER de la cobertura en particular. Solo en algunos casos se dan excepciones debido a la mezcla de píxeles. Normalmente estos valores mezclados son dependientes del tipo de cobertura, ya que en el ajuste realizado sobre los píxeles de vegetación identificados como “olivo”, “viñedo” y “coscoja”, han sido los menos eficientes de toda la serie, así como también los píxeles obtenidos para la referencia “piscina”.

La resolución espacial de las imágenes AHS no permite realizar distinciones, en los píxeles, entre el elemento detectado en la FER y otros materiales alrededor del mismo. Siempre y cuando sean de dimensiones menores a 2 m, tal como sucede con la vegetación y el suelo visible entre las plantas, o como el agua y las paredes del tanque. Por esta razón, se generan píxeles mezclados que al ser comprobados con las FER de propiedades exclusivas de un material, no se ajustan las curvas. Esto también explica

que existan leves diferencias en los ajustes que si se realizan de forma adecuada y que ningún píxel se ajuste de forma exacta a las FER.

En líneas generales, los métodos de corrección atmosférica calculan valores de reflectividad que son superiores a los valores de las FER obtenidas en campo. El método FLAASH suele hacer más sobreestimaciones que el método QUAC, tal como se visualiza en los gráficos de las figuras anteriores, aunque la forma de las FER se ajusta mejor con el primer método, como lo describen los coeficientes de correlación de Pearson calculados.

En la zona del EEM visible e infrarrojo cercano, los ajustes son más precisos que en otras zonas del infrarrojo. La región del infrarrojo es una zona del EEM propenso a manifestar muchas alteraciones en las imágenes, porque las ventanas atmosféricas⁹ de esta zona del EEM son más restrictivas. Lo que a su vez afecta a las radiaciones recibidas por los sensores. Las correcciones atmosféricas realizadas sobre esta región presentan menos uniformidad, a causa de los datos de origen, además de que los procedimientos de corrección automáticos no eliminan por completo las interferencias externas captadas por los sensores, ya que la zona del infrarrojo es más sensible a compuestos atmosféricos como el vapor de agua y otros gases (O_2 , CO_2 , O_3).

Las correcciones en esta región requieren de datos más específicos para realizar un ajuste más adecuado, lo que se escapa del alcance de los algoritmos automatizados en algunas herramientas informáticas. A pesar que algunos píxeles presentan datos irregulares entre 2200 – 2400 nm, el ajuste realizado en esta zona es satisfactorio con ambos métodos de corrección atmosférica. Este comportamiento registrado en las imágenes AHS, posiblemente también esté influenciado por una saturación en el sensor en algunas bandas de esta zona del EEM, donde la acción de alguno de los componentes atmosféricos señalados cause interferencia.

En esta investigación se decidió utilizar las imágenes que fueron corregidas con el método FLAASH, en vista de que realiza correcciones adecuadas, tal como manifiestan

⁹ Zonas del espectro electromagnético donde el efecto de la atmósfera es nulo o el menor posible. En otras palabras, aquellas longitudes de onda donde la transmisividad atmosférica es elevada. (REF)

los valores de los indicadores y emplea datos de la imagen al momento de adquisición de esta.

Aparte de las correcciones radiométricas, otros factores influyen para seleccionar las imágenes que sean más apropiadas en la investigación y entre ellos destacan la resolución espacial y espectral (ver apartado 3.1). En comparación con las imágenes AHS, las CASI1500i poseen una mejor resolución espacial (0,5 y 1,5 m), a pesar de que incrementa considerablemente el volumen de datos a procesar y el tiempo de procesamiento.

Las imágenes CASI poseen una mayor resolución espectral, lo que permite diferenciar mejor los píxeles asociados a una cobertura en específico, sobre todo aquellos relacionados a la vegetación y puntos en específico (piscinas y zonas conocidas de emisión). Además la discriminación de bandas es más alta, por lo que se genera una cantidad mayor de bandas espectrales. No obstante la zona del EEM cubierta es menor y solo abarca el visible y el infrarrojo cercano (400 hasta 1100 nm), y por el lado contrario, esta mayor cantidad de bandas origina un volumen de datos considerablemente elevado y costoso en tiempo y recursos para su procesamiento.

Las imágenes AHS de vuelo bajo poseen una resolución espacial equivalente a 2 m por píxel. Estas dimensiones resultaron efectivas para el estudio, porque discriminan adecuadamente diferentes coberturas terrestres. Al mismo tiempo mantienen requerimientos para el procesamiento informático de las imágenes más accesibles en recursos y tiempo. La resolución espectral de las imágenes AHS, que abarcan la zona del visible, infrarrojo cercano y medio (400 hasta 2600 nm), ofrecieron posibilidades adecuadas para el estudio de diferenciar las características de las coberturas, sin tener que procesar demasiadas bandas espectrales.

Las imágenes AHS se eligieron para aplicar las propuestas metodológicas, ya que en estas se visualizan los análogos naturales conocidos, debido al tamaño de píxel de 2 m. Además por otra de sus propiedades destacables, la amplia resolución espectral, que se expresa en las más de 30 bandas espectrales que abarcan desde el visible hasta el infrarrojo medio. Esto facilitó la discriminación de las diferentes coberturas que conforman las emisiones de fugas (suelos, vegetación y humedad) conocidas.

7.2. Propuesta A: Análisis de todas las bandas espectrales y aplicación del método de las correlaciones cruzadas.

De acuerdo con los planteamientos realizados en el apartado 6.3, el fundamento de esta propuesta consiste en procesar todas las bandas espectrales así como relacionarlas con las FER obtenidas en campo, a través de la técnica de las correlaciones cruzadas. Dentro de los píxeles representativos de los análogos naturales conocidos, se pretendió determinar las características espectrales relacionadas a los indicios de fugas de CO₂. Esta información se utilizó para intentar localizar otras fugas desconocidas. La propuesta consiste en tres fases diferenciadas que se detallan a continuación.

7.2.1. Selección de las firmas espectrales de referencia (FER).

Teóricamente tiene que manifestarse en las imágenes hiperespectrales cambios que señalen la presencia de CO₂, dependiendo de la cantidad de emisiones de CO₂. Por esta razón, las FER más representativas del estudio están constituidas por aquellas correspondientes a los análogos naturales conocidos.

Las observaciones in situ corroboraron la presencia de emisiones de CO₂ en los análogos naturales mencionados en la tabla 13 del apartado 6.2.1. Los indicios que destacan una fuga fueron:

- i. el burbujeo constante o intermitente en alguna charca (análogos húmedos) y,
- ii. áreas de suelo ausentes de vegetación ubicados en pequeñas depresiones (análogos secos).

En ambos escenarios también se observó la presencia de pequeños animales muertos (insectos, reptiles, aves y pequeños mamíferos). De igual manera, se ha tomado como referencia parte de los resultados de los trabajos de Elío, J., et al (2015) y Gutiérrez del Olmo, J. (2015), quienes cuantificaron los caudales de CO₂ en algunos análogos naturales de la zona de estudio (ver apartado 3.5 y 5.5).

Como resultado de lo anteriormente expuesto, las FER seleccionadas fueron las siguientes: Carrizo BP, Piscina BP, Sima 01y Plantita BP. En estas FER no se han observado

picos ni valles en sus gráficos de reflectividad (figura 51), que indiquen una alteración considerable en las zonas de absorción del CO₂ (1400, 1600 y 2000 nm). Es por ello que las FER reflejan las propiedades de los elementos a los que están asociados el análogo natural, en otras palabras, la FER Carrizo BP se asocia a la vegetación, la FER Piscina al agua dentro de un almacén descubierto con burbujeo de gases y, las FER Sima 01 y Plantita BP a tipos de suelos. En estas firmas no se determina ninguna variación importante en longitudes de onda donde el CO₂ es detectable.

Figura 51. Firmas espectrales obtenidas del radiómetro de campo para las coberturas: carrizo BP (a), plantita y limo BP (b), Piscina BP (c) y Sima 01 (d). BP: Barranco Pequeño.

Además se seleccionaron otras FER de las coberturas más comunes en la zona, para verificar la capacidad de clasificación que tiene el método de las correlaciones cruzadas, correspondientes a “Suelo Desnudo 05” y “Olivo”. La primera por la presencia extendida en la zona de estudio y la segunda por la forma que se presenta en las imágenes en patrones regulares relacionado al método de cultivo.

7.2.2. Cálculo de las correlaciones cruzadas.

El tratamiento de los datos requirió la elaboración de ficheros para organizar los datos de la FEP de cada píxel en la imagen. El proceso consistió en la extracción de los datos hacia unos ficheros de texto y una vez organizados conformaron las entradas en el programa R.

Figura 52. Correlograma de cuatro píxeles (FEP) de la imagen AHS P06BD respecto a la FER "Olivo".

El algoritmo propuesto efectuó los cálculos de la correlación cruzada en una iteración para cada FEP con una de las FER seleccionadas, basados en los procedimientos del apartado 6.3. La posición $m = 0$ indica que los valores de la FER y la FEP estaban pareados. El *lag* o retraso, que determina el desplazamiento de m , se determinó en 23 posiciones para reducir las dimensiones de los datos.

Para construir el correlograma, el algoritmo desplazó una posición la FER respecto a la FEP (el signo de m indica la dirección del desplazamiento). El valor absoluto de m señalaba la disminución de los datos pareados en el cálculo de la correlación. En otras palabras, se calculó un coeficiente con datos pareados a medida que el valor de m se alejara de cero y esto a su vez implicó que se utilizaran menos pares de datos (ver figura 33 en el apartado 6.3).

Tabla 15. Valores de los parámetros RGB de cuatro píxeles de imagen AHS P06BD respecto a la FER Olivo.

Píxel (FEP)	Coefficiente de correlación $r_m=0$	Oblicuidad	Significancia estadística
Series 1	0.99813286	0.61523997	5.70193925
Series 2	0.59297981	0.62054999	1.76885809
Series 3	0.52157396	0.79001811	1.14218207
Series 4	0.51749972	0.67433078	1.57386375

La sucesión de valores calculados generan un gráfico denominado correlograma, el cual describe la relación entre la FER y la FEP. El pico de la curva viene dado por el coeficiente en $m = 0$ y está asociado al coeficiente de correlación más alto. El correlograma de cada píxel es empleado para calcular el siguiente parámetro, denominado la oblicuidad o skewness. Este corresponde a la diferencia entre la forma del correlograma respecto al correlograma ideal (autocorrelación de la FER). Los valores elevados para este parámetro señalaban correlogramas asimétricos.

En la figura 52 se aprecia como los correlogramas más parecidos a la FER “Olivo”, en la imagen AHS P06BD, tienen una forma de campana simétrica. El píxel identificado como serie 1 corresponde a la cobertura de vegetación “olivo” o a otro tipo de vegetación similar. Mientras que en aquellos píxeles representando una cobertura distinta (resto de series), disminuyen el coeficiente de correlación, aumenta su valor de oblicuidad y tienen una forma más distorsionada.

Para cada de píxel de cada imagen se calculan tres parámetros:

- El coeficiente de correlación en el punto de comparación cero $r_m = 0$.
- La oblicuidad o skewness.
- La significancia estadística.

En la tabla 15 se detallan los parámetros calculados para los 4 píxeles, que fueron comparados con la FER “Olivo” y los datos se corresponden con los planteamientos anteriormente descritos. Las otras FER generan gráficos similares al de la figura anterior.

Basado en los procedimientos descritos por van der Meer, et al. (1997), en el apartado 6.3, se construyeron imágenes nuevas a partir de los parámetros calculados, cuyo procedimiento se describen a continuación.

7.2.3. Reclasificación de las imágenes.

Los cálculos de las correlaciones y otros parámetros asociados a los correlogramas permitieron hacer una clasificación de las imágenes hiperespectrales, según las FER disponibles. Estos valores fueron recalculados en una nueva escala entre cero y uno. A partir de los nuevos valores, se realizó la reclasificación mediante la técnica de la composición en falso color, como se ha descrito en el apartado 6.3.

Las zonas blancas señalan los puntos que obtuvieron valores altos para los tres parámetros calculados. El resto de tonalidades expresan la proporción de los valores y significan que el píxel tiene menos similitud a la FER evaluada.

La reclasificación de píxeles empleando correlogramas cruzados resulta adecuada para identificar materiales asociados a la FER utilizada. A pesar de ello, el haber empleado los elementos particulares de los análogos naturales no se destacaron zonas relacionadas con los análogos naturales.

7.2.3.1. Firmas espectrales de referencia asociadas a los análogos naturales húmedos.

La FER piscina resultó muy útil para identificar zonas del río descubiertas de vegetación, así como también otros cuerpos de agua (estanques, lagunas, entre otros). En la figura 53, se visualiza la zona de los hervideros de barranco pequeño (izquierda), donde se observa en blanco el punto de obtención de la FER (círculo rojo), y por tanto píxeles con valores de casi 1 para la correlación en la posición $m = 0$.

En el caso de esta imagen y FER, los tonos azules señalan aquellos píxeles relacionados con la vegetación, aunque no hace distinción entre las especies. Se aprecia que la vegetación en las orillas del río Jabalón, así como los olivares presentan la misma tonalidad. El otro grupo de píxeles lo conformaron las tonalidades amarillas y verdes, asociadas a los suelos desnudos.

El método señaló un análogo natural conocido como “Cañada Real” (ver figura 53 derecha). Este análogo, previamente documentado en otros estudios (Gutiérrez del Olmo, J., 2015), es de los más importantes en la zona debido a la cantidad de gases que libera, que se manifiesta con burbujeo constante y abundante.

Figura 53. Imagen reclasificada AHS P04BD (izq.) y P01BD (der.) con la firma espectral de referencia "Piscina". Elipse roja izquierda: FER; derecha: "Cañada Real". Zonas blancas: cuerpos de agua. Zonas azules: vegetación. Zonas amarillas: suelos y otros.

En las imágenes de la figura 54 se evidencian las características de la Cañada Real. Es importante destacar que el lugar se aprecia intervenido por acción antrópica, ya que se observaron árboles y arbustos ornamentales sembrados, así como algunas modificaciones (escalones y bordes de cemento) en una de las piscinas charcas.

Figura 54. Hervidero "Cañada Real", fecha de visita 07 de mayo de 2014.

A pesar de la identificación de este punto de emisión, en las nuevas imágenes se observó la misma respuesta espectral en otros puntos de la zona de estudio. No obstante la gran mayoría no estaban asociados a la emisión de CO_2 . Se dedujo que los aspectos que el método ha considerado fueron las características espectrales del agua, porque no se evidenció alguna relación con la emisión del CO_2 o con algún elemento de un sistema de emisiones (vegetación o la distribución de la vegetación).

Esta situación también sucede con la FER agua de barranco pequeño, que consiste en una charca de (1m de diámetro) que presenta burbujeo de CO_2 y rodeada de juncos y

otras especies de vegetación. La respuesta de los FEP tampoco se relacionó a las emisiones de CO₂.

7.2.3.2. Firmas espectrales de referencia asociadas a los análogos naturales secos.

La Sima es un análogo natural seco con emisiones elevadas, tal como se menciona en el apartado 5.4.2. En este análogo natural se adquirieron firmas espectrales de distintos elementos, como se detalla en la tabla 11 del apartado 5.2. Los correlogramas se calcularon con la FER “Sima 01”, que en líneas generales presenta características de suelo.

Figura 55. Imagen reclasificada AHS P04BD (izq.) P08BD (der.) con la firma espectral de referencia “Sima 01”. Elipse roja FER. Zonas blancas: suelos. Zonas verde claro y oscuras: vegetación. Zonas azules: agua.

En la figura 55 se puede apreciar como el punto La Sima fue identificado con píxeles blancos (círculo rojo). No obstante el método reclasificó zonas de suelo desnudo de forma parecida al análogo natural, aunque no se evidenciaron indicios de emanaciones de CO₂. La reclasificación obtenida está asociada al tipo de suelo del área, mas no a las emanaciones. Resulta muy probable que el suelo de la Sima debe tener propiedades parecidas a los suelos de otras zonas del área de estudio.

Las ideas mencionadas con anterioridad se basan en que grandes extensiones de terreno, asociadas a terrenos agrícolas descubiertos, en los que obtuvieron valores altos en los parámetros calculados. Por lo tanto se generaron píxeles en colores claros y blancos. Estos se aprecian en la zona norte de la Sima (figura 55, derecha) y en las zonas de suelo descubierto cercanos al río Jabalón (figura 55 izquierda). Además se discrimina entre diferentes tipos de suelos, donde la presencia de compuestos en cada tipo de

suelos determina las diferencias entre estos, y por lo tanto en clasificaciones diferentes que se aprecian en las tonalidades rosas.

7.2.3.3. Firmas espectrales de referencia asociadas a otras coberturas terrestres.

Como se ha visto en la reclasificación de imágenes con las FER de los análogos naturales, el método aplicado realiza clasificaciones adecuadas de las coberturas, excepto de las emisiones. Las FER de algunas coberturas comunes en la zona de estudio, también se emplearon para aplicar el análisis y verificar su capacidad de clasificación espectral de píxeles.

Figura 56. Imagen reclasificada AHS P06BD con la FER "Olivo" (izquierda) y AHS P04BD con la FER "Carrizo".

El uso de la FER "Carrizo", relacionada con las especies de juncos de la vegetación de ribera de un análogo natural, claramente clasifica los píxeles según las características de vegetación (figura 56 derecha). Por lo tanto, la imagen resultante agrupa los píxeles pertenecientes a la vegetación de ribera, los cultivos (olivos, viñedos), y otras especies vegetales que se encuentran en estado fenológico saludable. Además clasifica de forma contraria a las coberturas distintas como los suelos descubiertos, carreteras y cuerpos de agua.

La situación similar se describe con la FER "Olivo" (figura 56 izquierda). El método fue capaz de realizar una clasificación adecuada de la vegetación, no obstante no hizo distinción entre los olivares y otras especies vegetales o cultivos. Los tonos blancos también corresponden a la vegetación, mientras que los tonos lilas al suelo descubierto.

Figura 57. Imagen reclasificada AHS P04BD con la FER "Suelo desnudo 5".

Mientras que con el empleo de la firma suelo desnudo 05 (figura 57), también se realiza una clasificación que concuerda con las experiencias previas, solo que los colores ahora son distintos. Los píxeles asociados a suelo, se presentan en tonos blancos y muy claros, mientras que en otros colores, los píxeles de las coberturas restantes.

7.2.3. Observaciones a la aplicación del método de las correlaciones cruzadas.

El método se mostró efectivo para realizar clasificaciones utilizando firmas espectrales de un material conocido, tal como se ha mencionado anteriormente. Se generaron imágenes donde los tonos blancos correspondían con la FER evaluada, agrupando en grandes grupos la clasificación de esa cobertura terrestre.

Sin embargo, en el ámbito de esta investigación, la clasificación realizada no destaca zonas con indicios de emisiones de CO₂. Es posible que las emisiones en el campo de Calatrava no posean un caudal elevado que sea detectable por medios remotos aeroportados. Es necesario utilizar un sistema que identifique las diferentes coberturas con mayor precisión e integre los datos.

7.3. Propuesta B: Selección de bandas por Análisis de Componentes Principales (ACP) y elaboración de ratios entre bandas espectrales.

Con esta propuesta se pretende obtener información indirecta de las emisiones de CO₂. El análisis se sustenta en la selección de algunas bandas espectrales que contengan la mayor variabilidad de datos mediante la técnica de ACP.

Posteriormente las bandas seleccionadas se emplean para calcular relaciones entre ellas por medio de cocientes. Por comparación de los ratios entre bandas obtenidos en las zonas de emisiones conocidas, los resultados son extrapolados al resto de la imagen para identificar indicios de emisiones en otras partes de la imagen. A continuación se describe el proceso realizado y los resultados obtenidos.

7.3.1. Análisis de Componentes Principales (ACP).

El paso previo para la aplicación del ACP consistió en determinar que todas las bandas espectrales son óptimas para este análisis, es decir, minimizar la presencia de datos extremos o anómalos que distorsionen los cálculos. Las imágenes AHS contienen datos considerados extremos, además de ruido, en algunas bandas espectrales, que generalmente se ubican en la región del infrarrojo medio o donde la transmisividad de la atmósfera influye en las radiaciones. Por esta razón, se tomó la decisión de excluir estas bandas del análisis y solo emplear 34 bandas. Las bandas elegidas abarcan desde la número 1 (443 nm) hasta la 36 (2165 nm). De estas bandas se excluyeron la 22 (1940 nm) y la 23 (1957 nm), ya que se observaron indicios de poca calidad, tales como la presencia de líneas que alteraban la composición de la imagen.

Una vez realizado el ACP, se ha reducido significativamente las dimensiones de las imágenes hiperespectrales AHS. La información se condensa en 10 nuevas bandas, llamadas componentes principales, que se traduce en una reducción de 24 bandas. Estas corresponden aproximadamente al 98% o más de la varianza total de los datos en cada imagen. Cada componente principal expresa la reorganización de los datos según la transformación ortogonal o movimiento de los ejes basado en los autovectores calculados, sobre los que se proyectan los datos.

El proceso se basa en el cálculo de dos parámetros matemáticos que miden la transformación de los datos. Para cada componente principal existe un autovalor o eigenvalue, que determina la varianza del conjunto de datos. A partir de este se determina la nueva orientación de los ejes a la n–dimensión de los datos, generando el segundo parámetro, denominado autovector o eigenvector. Este parámetro representa el nuevo eje de proyección de los datos y por tanto de la transformación de los nuevos valores.

Las primeras tres componentes de cada imagen concentran la gran mayoría de la varianza de los datos. Por otra parte el autovector de cada componente se descompone en otra serie de vectores. Cada uno de ellos corresponde a la contribución que realiza cada banda espectral de la imagen hiperespectral original en la correspondiente componente principal determinada. La participación que cada banda espectral realiza a una componente se determina aplicando la suma de cuadrados:

$$\text{Peso de la banda } b = \frac{(\text{autovector } b)^2}{\sum_1^n \text{autovector}^2}$$

Donde b es la banda espectral de la imagen y n el número total de bandas. Al utilizar 34 bandas de las imágenes AHS, el vector único de cada componente contiene 34 elementos. Cabe destacar que este método es capaz de diferenciar muchos tipos de coberturas empleando menos recursos de memoria, ya que se ha logrado una reducción de 34 bandas espectrales a 10 componentes.

Partiendo de estos planteamientos, en el estudio se decidió elegir las tres primeras componentes principales de cada imagen y los dos elementos que más aporte generan a cada vector único.

En los resultados de la verificación de las correcciones radiométricas, del apartado 7.1.5, fue demostrado que, respecto a las correcciones atmosféricas, el método FLAASH ofrece resultados ligeramente más satisfactorios que el método QUAC. Considerando esta situación se realizó el ACP en ambos grupos y los resultados obtenidos señalaron que no existen diferencias considerables entre las bandas seleccionadas. El resumen de los datos se encuentra en la tabla 16. Por lo tanto, los análisis posteriores se efectuaron con el conjunto de imágenes AHS que recibieron la corrección atmosférica con el método FLAASH.

Tabla 16. Aporte de varianza de cada banda a cada componente principal de las imágenes hiperespectrales AHS corregidas atmosféricamente con QUAC y FLAASH.

I QUAC	Componente Principal 1				Componente Principal 2				Componente Principal 3			
	Valor único	B	Vector único	Corr	Valor único	B	Vector único	Corr	Valor único	B	Vector único	Corr
P01BD	15891734 77,69 %	17	0,237	0,981	3609496 17,64 %	17	0,586	0,581	562336 2,74 %	28	0,237	0,969
		13	0,104			3	0,086			30	0,119	
P02	12203757 79,26 %	10	0,300	0,764	2475190 16,07 %	10	0,404	0,766	410399 2,66 %	30	0,233	0,970
		14	0,154			13	0,119			28	0,229	
P03	44800784 91,27 %	11	0,128	0,935	3377638 6,88 %	11	0,658	0,993	485929 0,98 %	30	0,212	0,834
		5	0,127			12	0,089			20	0,175	
P04BD	19139245 79,15 %	14	0,321	0,993	3756996 15,53 %	15	0,274	0,998	739910 3,06 %	28	0,295	0,964
		12	0,100			14	0,262			30	0,150	
P05	24449484 86,49 %	18	0,180	0,841	2661218 9,41 %	18	0,494	0,729	729411 2,58 %	28	0,225	0,954
		10	0,127			3	0,080			21	0,120	
P06BD	15527208 83,60 %	9	0,176	0,772	2019129 10,87 %	12	0,412	0,995	734553 3,95 %	30	0,201	0,977
		12	0,121			14	0,160			28	0,173	
P07BD	10867184 82,15 %	11	0,277	0,988	1572646 11,88 %	9	0,723	0,798	560461 4,23 %	28	0,234	0,695
		16	0,151			3	0,074			19	0,120	
P08BD	15111561 79,86 %	16	0,122	0,982	2554490 13,50 %	8	0,702	0,996	786241 4,15 %	20	0,185	0,597
		13	0,113			7	0,120			3	0,126	

I FLAASH	Componente Principal 1				Componente Principal 2				Componente Principal 3			
	Valor único	B	Vector único	Corr	Valor único	B	Vector único	Corr	Valor único	B	Vector único	Corr
P01BD	13835584 80,00 %	25	0,357	0,734	2840477 16,42b %	19	0,621	0,958	334063 1,93 %	27	0,213	0,976
		5	0,064			13	0,072			31	0,155	
P02	21178397 79,16 %	10	0,156	0,782	4343876 16,23 %	11	0,478	0,890	737312 2,75 %	29	0,270	0,993
		12	0,151			10	0,144			26	0,227	
P03	13342677 81,99 %	25	0,218	0,466	2356131 14,47 %	13	0,659	0,986	292532 1,79 %	30	0,313	0,968
		13	0,134			16	0,073			28	0,106	
P04BD	12406117 81,64 %	19	0,263	0,398	2236792 14,72 %	19	0,614	0,978	272201 1,79 %	28	0,209	0,996
		25	0,162			15	0,083			31	0,205	
P05	21235732 87,09 %	24	0,257	0,984	2437958 9,99 %	25	0,478	0,672	404404 1,65 %	29	0,180	0,983
		26	0,237			13	0,116			28	0,144	
P06BD	20482838 85,71 %	17	0,160	0,986	2564410 10,73 %	16	0,606	0,990	540760 2,26 %	28	0,156	0,995
		13	0,120			13	0,087			29	0,113	
P07BD	18555637 84,13 %	20	0,372	0,962	2636473 11,96 %	11	0,331	0,930	545862 2,47 %	29	0,249	0,666
		13	0,094			10	0,193			14	0,168	
P08BD	14547926 83,17 %	17	0,221	0,79	2161571 12,35 %	12	0,879	0,775	438531 2,5 %	29	0,356	0,595
		20	0,167			9	0,032			14	0,086	

El valor único se presenta como escalar y porcentaje del total de la sumatoria de valores únicos de todas las componentes principales. B: Banda espectral. Corr: Coeficiente de correlación entre las bandas. I: Imagen.

7.3.1.1 Determinación de la zona del espectro electromagnética con mayor varianza en los datos.

Dada la naturaleza matemática del ACP, las transformaciones generadas son únicas para cada imagen. Es por ello que este método determina bandas diferentes en cada una de ellas, no obstante se aprecia una tendencia a ciertas zonas del EEM.

El procedimiento arroja como resultado que las bandas que mayor contribución realizan a la varianza se ubican en las siguientes zonas del EEM:

- entre azul y verde visible (500 - 560nm)
- en el infrarrojo cercano (776-1000 nm), siendo las más destacadas
- en el infrarrojo medio (2000-2100 nm)

El método ACP ha determinado en menor cantidad bandas espectrales en la zona visible, pero en el infrarrojo cercano es donde más detecta esta variabilidad de los datos y concentrados en una región, en la banda 13 centrada en 796 nm. Por lo tanto, a diferencia de los datos anteriores, la variabilidad está más distribuida en ciertas bandas.

Por otra parte, lo contrario sucede con la zona del infrarrojo medio, ya que en las imágenes AHS la variabilidad se concentra especialmente en las bandas 28 y 30, existiendo una elevada frecuencia de repetición en el ACP de dichas bandas.

Las bandas ubicadas en la zona del infrarrojo cercano son seleccionadas en la primera componente principal de las imágenes AHS. En la segunda componente en la selección hay variedad entre el visible y el infrarrojo cercano, y en la tercera componente tienden a ser elegidas las bandas ubicadas en el infrarrojo medio. La tabla 17 resume las bandas espectrales seleccionadas por el ACP y destacan aquellas que fueron seleccionadas múltiples veces.

Un factor determinante que contribuye a generar estas diferencias radica en la distribución de las distintas coberturas terrestres. En un entorno agrícola como es el de la zona de estudio, las grandes diferencias vienen dadas por los suelos descubiertos, los cultivos, la vegetación silvestre, los cuerpos de agua y las estructuras antrópicas. Debido a que cada imagen tiene diferentes porcentajes de cada cobertura, el resultado el análisis de componentes principales es distinto para cada una de las coberturas tal como lo demuestran los resultados anteriores.

La figura 58 presenta un desglose de dos imágenes AHS contiguas (P02 y P03), en sus tres primeras componentes principales. Según las bandas en las que ACP detecta la mayor variabilidad, normalmente suelen reflejar coberturas opuestas y por ello se distinguen claramente los elementos que reflejan y absorben estas radiaciones. En las otras componentes existen otras diferencias más sutiles que se encuentran fuera de la mayoría de datos y ofrecen indicios de otras propiedades. Sin embargo para el estudio presentaron muchas interferencias y resultaron en información redundante. A pesar de que la mayoría de ellas fueron removidas con las correcciones radiométricas.

Tabla 17: Resumen de las bandas espectrales de AHS obtenidas de las componentes principales de las imágenes hiperespectrales AHS corregidas atmosféricamente con los métodos QUAC y FLAASH.

Imagen AHS con corrección atmosférica QUAC			Imagen AHS con corrección atmosférica FLAASH		
Banda AHS	Longitud de onda (nm)	Frecuencia	Banda AHS	Longitud de onda (nm)	Frecuencia
3	500	4	5	560	1
5	560	1	9	679	1
7	620	1	10	709	3
8	650	1	11	738	2
9	679	2	12	767	2
10	709	2	13	796	7
11	738	3	14	826	2
12	767	4	15	856	1
13	796	4	16	885	2
14	826	4	17	914	2
16	885	2	19	973	3
17	914	3	20	1001	2
18	943	2	24	1957	1
19	973	1	25	1973	4
20	1001	2	26	1989	2
21	1590	1	27	2006	1
28	2020	6	28	2022	4
30	2054	5	29	2038	5
			30	2054	1
			31	2071	2

Es recomendable tener en cuenta que la transformación matemática de los datos no concuerda con la interpretación sobre las interacciones de las coberturas terrestres con las radiaciones recibidas. Por lo tanto, dos elementos que son parecidos, pueden representarse como opuestos en alguna de las componentes, sin embargo, el resto de componentes aportan más relaciones. A final de cuentas, queda a criterio del usuario como interpretar la transformación de datos realizada por el ACP.

En la figura 59 se visualizan dos imágenes contiguas, P02BD y P03BD, en composición falso color RGB. En cada canal se asigna una componente principal de la siguiente manera:

- Canal rojo R: componente principal 1,
- Canal verde G: componente principal 2,
- Canal azul B: componente principal 3.

A primera vista se aprecia que las combinaciones de colores generadas no coinciden entre sí, no obstante basta con observar detenidamente las dos imágenes y detectar como la reorganización de los datos si tiene similitud.

Algunas coberturas fácilmente identificables, como la carretea o los cuerpos de agua (a y e en la figura 59), son clasificados con un color distinto en cada imagen. Además estas coberturas comparten propiedades parecidas, como la absorción de muchas radiaciones en regiones del EEM visible e infrarrojo. Otro ejemplo lo ofrece la vegetación con las letras b señala un olivar, la d la vegetación de ribera y un viñedo, y la letra e una zona de pastos y matorrales silvestres. La vegetación se caracteriza por reflejar buena parte de las radiaciones del infrarrojo cercano y lo convierte en un elemento distinguido del resto de coberturas.

Aquí se manifiesta una de las ventajas de las imágenes hiperespectrales. Al ser mayor su resolución espectral, en este estudio, permite señalar las diferencias presentes en distintas zonas del EEM. Como se ha mencionado anteriormente, las propiedades de cada material interaccionan de forma distinta y las diferencias se manifiestan en las imágenes.

Figura 58. Componentes principales de dos imágenes AHS, P02BD (izq.) y P03BD (der.).

Figura 59. Composición en falso color del ACP de dos imágenes AHS, P02BD (izq.) y P03BD (der.). R: componente principal 1, G: componente principal 2, B: componente principal 3.

Teniendo en cuenta la información de la tabla 17 se seleccionaron las siguientes bandas espectrales: 13, 19, 25, 27, 31. Es destacable que los resultados son muy dependientes de la imagen y el tipo de cobertura terrestre presente. La decisión se fundamenta en varios aspectos:

- La frecuencia con las que fueron señaladas en el ACP (bandas 13, 19, y 25). Además de otras bandas repetidas en menos ocasiones, pero muy cercanas a las mencionadas.
- En el caso de las dos últimas, se tomó en cuenta el rango 14 – 31 de bandas para elegir las más distantes en longitud de onda, excepto la 14 porque que se distancia demasiado del rango de bandas seleccionadas. Por ello se decidió seleccionar las bandas 27 y 31.

Es importante mencionar que el ACP de todas las imágenes no incluyó las mismas bandas. No obstante estas se localizaron en longitudes de onda muy cercanas entre sí, como se explica en los rangos de longitud de onda mencionados al inicio de este apartado.

7.3.2. Construcción de los ratios entre bandas.

Una vez identificadas las bandas espectrales, se procedió a la elaboración de los cocientes entre bandas. En primer lugar, se planteó calcular tres valores nuevos a partir de cada cociente. Estos resultados se emplearían en una nueva imagen que englobaría las zonas del EEM capaces de detectar los indicios de fugas basados en los análogos naturales conocidos. La elección de las bandas con mayor aporte a la varianza de las componentes principales, sirve como punto de partida para analizar los píxeles sin necesidad de comparar con las FER obtenidas en campo.

El diseño de los ratios se basó en los resultados anteriores del ACP. Las bandas que mayor contribución realizaron en cada componente se emplearían para la obtención del ratio. En otras palabras, las bandas de la componente principal 1 se utilizaron para el ratio 1 y así sucesivamente hasta el tercer ratio.

La tabla 18 hace un resumen de las bandas utilizadas, la construcción del ratio y el canal RGB en el que serían utilizados posteriormente para su representación. Los ratios así obtenidos tienen un cierto grado similitud con otros existentes en la literatura, como es el caso del NDVI¹⁰. La finalidad última del procedimiento propuesto fue la de unificar los datos de todas las bandas para que los resultados sean comparables entre sí.

Tabla 18. Bandas seleccionadas por los autores a partir del ACP de las imágenes AHS.

Ratio	Banda	Longitud de onda (nm)	Ecuación de ratio
Ratio A Canal Rojo (R)	19	973	$ratio = \frac{banda\ 19 - banda\ 25}{banda\ 19 + banda\ 25}$
	25	1973	
Ratio B Canal verde (G)	13	796	$ratio = \frac{banda\ 13 - banda\ 19}{banda\ 13 + banda\ 19}$
	19	973	
Ratio C Canal azul (B)	31	2071	$ratio = \frac{banda\ 31 - banda\ 27}{banda\ 31 + banda\ 27}$
	27	2006	

¹⁰ Normalized Differentiation Vegetation Index (NDVI) o el Índice de vegetación de diferencia normalizada, es un ratio que resalta las coberturas de vegetación utilizando bandas espectrales en la zona del infrarrojo cercano y el rojo visible. Se fundamenta en las propiedades espectrales de las plantas tales como la absorción de radiaciones del rojo visible por parte la clorofila y el reflejo de radiaciones en el infrarrojo cercano de la cutícula de las hojas (Tucker, CJ, 1979).

En la figura 60, se aprecian una serie de gráficos que describen las relaciones de los datos entre las bandas previamente seleccionadas de dos imágenes AHS (P03BD y P04BD).

En los gráficos superiores se observa como los datos de las bandas 25 (eje x) y 19 (eje y) tienen dos tendencias, plasmando la relación entre la zona del infrarrojo cercano y el infrarrojo medio. Por un lado los datos se agrupan en un eje donde se manifiesta la vegetación (a) y en el otro los suelos (c). Cabe destacar la zona intermedia *b*, que determina el grado de mezcla de los píxeles entre vegetación y suelo, en la mayoría de los casos. Mientras que en la parte inferior *d* se localizan, agrupados en un conglomerado, las coberturas que absorben considerablemente ambas radiaciones (cuerpos de agua y asfalto).

La nube de puntos en la zona delimitada como *c* expresa una relación lineal, directamente proporcional, que identifica las propiedades espectrales del suelo. La recta que describe esta nube de puntos expresa que, si la reflectividad de un píxel en cualquiera de estas dos bandas es similar, dicho píxel podría considerarse como suelo.

De la misma manera, a medida que aumenta la pendiente de esta recta, los píxeles adquieren cada vez más características de la vegetación. La zona *b* agrupa a los píxeles mezclados mencionados en los apartados 7.4.1. Por lo tanto cuanto mayor sea la reflectividad en la banda 19 y menor en la 25, el píxel sería de vegetación, mientras que la situación contraria resalta un píxel de suelo. La nube de puntos de la zona indica que la vegetación posee reflectividad elevadas en el infrarrojo cercano y muy baja en el infrarrojo medio.

En cuanto a las otras bandas, la relación es más estrecha y lineal, que concuerda con la alta correlación entre estos (gráficos c al f). La agrupación de los datos no resulta tan evidente como en el caso anterior. A pesar de que las pendientes de los grupos de datos fueron más uniformes, de todas maneras en ellos fue posible distinguir distintas coberturas. La característica común de los gráficos fue que señalan los elementos con mayor absorción en la parte inferior, tal como se mencionó anteriormente.

Figura 60. Gráficos de densidad de la reflectividad en las bandas seleccionadas para los ratios a partir del ACP de dos imágenes AHS, P04BD (izq.) y P03BD (der.).

Figura 61. Diagrama de flujo de la elaboración de la nueva imagen RGB basada en los ratios.

Para la integración de los tres ratios en una nueva imagen se utilizó el software ArcGIS. En la figura 61 se presenta el diagrama de flujo seguido para la generación de la imagen nueva.

7.3.2.1. Significado de los ratios espectrales.

El resultado de la aplicación de este flujo a las imágenes consideradas se presenta en la figura 62 y el anexo 9. La imagen (1) consiste en la composición en falso color de los tres cocientes y las imágenes restantes cada cociente individual.

La selección de múltiples bandas en el infrarrojo cercano está relacionada, principalmente, con la presencia de humedad, ya sea en forma de cuerpo de agua o como parte de la vegetación. El agua y algunas coberturas como el asfalto de las carreteras se han diferenciado, ya que absorben este tipo de radiaciones. Otro indicio recae en los suelos secos, que reflejan estas radiaciones y contrastan con las mencionadas anteriormente. Igualmente destaca la alta reflectividad que tiene la vegetación esta zona del EEM, especialmente de acuerdo al grado de desarrollo y estado

de salud, es decir, que las plantas sanas y en estado de crecimiento reflejan considerablemente las radiaciones en el infrarrojo cercano.

Figura 62. Imagen de con los valores obtenidos de los ratios sobre el río Jabalón. Composición en falso color de los tres ratios (1). ratio A (2), ratio B (3), ratio C (4).

Las coberturas en Campo de Calatrava fueron clasificadas correctamente con los índices calculados. La figura 62-1 muestra una parte de la zona de estudio, donde se ha resaltado:

- Fucsia: cuerpos de agua y sin cubiertas de vegetación o sedimentos. Superficie del río Jabalón, estanques.
- Amarillo y blanco: vegetación con altos contenidos de clorofila y verdes, en estado de buena salud e incluye árboles altos y densos. Por ejemplo: las riberas cubiertas de vegetación, quercus, almendros y algunos olivos.
- Amarillo hasta tonos rosas: especies de vegetación de tamaño mediano, menor a 3 m, gramíneas y pastizales, agrupaciones de ulex y otros arbustos.
- Azules y verdes azulados: suelos desnudos.

Apartando el color, la distribución de los píxeles ayudó a determinar las coberturas presentes. Las zonas de cultivo son un ejemplo, donde los patrones regulares como el

de los olivares o viñedos permiten realizar una clasificación a pesar de que muchos píxeles estén mezclados o no se distingan claramente.

Figura 63. Índice de vegetación normalizado calculado a partir de la imagen AHS P03 de las zonas Barranco Pequeño y Baño Chico.

En la figura 62 (2, 3, 4), se presentan los resultados individuales de cada ratio. Al estar los ratios normalizados los valores abarcan desde 1 hasta -1. Los tonos verdes representan los valores positivos, los amarillos valores positivos y negativos entorno a cero y los rojos los valores negativos.

El NDVI es uno de los índices más utilizados en investigaciones relacionadas con el estudio de vegetación y recursos naturales. Los ratios obtenidos y este índice tienen similitudes para clasificar elementos de la cobertura terrestre. Este índice es muy práctico, ya que realiza la clasificación de una imagen entre la vegetación y demás elementos distintos a esta, utilizando dos bandas espectrales en el rojo visible e infrarrojo cercano (figura 63 y anexo 10).

A diferencia de los ratios planteados en esta propuesta, el NDVI no incluye la zona del infrarrojo medio y por tanto no detecta contenidos de humedad menos evidentes, como el que se encuentra presente en algunos suelos. En este sentido, resulta ventajoso incluir estas informaciones porque existe la posibilidad de que algunos análogos naturales presenten emisiones difusas y que sean capaces de arrastrar humedad desde los acuíferos hasta la superficie, sin necesidad de generar una charca o cuerpo de agua (fácilmente detectado por el NDVI). Además que esta humedad, también podría

fomentar el desarrollo de vegetación verde y vigorosa en zonas escasas de agua, que si esta se encuentra rodeada de otro tipo de vegetación menos verde y más baja, servirá como evidencia para la detección indirecta de fugas de CO₂.

7.3.2.2. Los análogos naturales representados por los ratios.

Los análogos naturales conocidos y documentado tienen unas características especiales que se manifiestan en la imagen en falso color elaborada a partir de los ratios. En la figura 64 se observa cómo estos análogos están asociados a la vegetación verde y vigorosa, no obstante en ellos destacan especialmente las formas y el entorno en el que se encuentran.

En el hervidero de la imagen *a*, documentado por Gutiérrez del Olmo, J. (2015), se aprecia la forma circular que representa a la vegetación de juncos alrededor de la pequeña charca de agua, y también hay que añadir que esta comunidad vegetal se encuentra rodeada de vegetación más baja y seca, tales como pastizales propios de la zona. El agua presenta evidencias de emisiones a través de las burbujas que emanan a la superficie, pero en las imágenes no hubo respuesta a este fenómeno.

Figura 64. Localización de análogos naturales: hervidero cerca de río Jabalón (Gutiérrez, J.) (a), Baño Chico (b) y Barranco Pequeño (c).

En la imagen *b* se presentó una situación parecida a la de la imagen *a*. Los análogos señalados también están asociados a vegetación de ribera, que es muy verde y alta, pero que están rodeadas de campos de cultivos (olivares) o suelos descubiertos. En cuanto a la imagen *c*, el análogo natural de Barranco Pequeño es parecido al de la imagen *a*, pero

se diferencia en que se localiza más cerca del río Jabalón y por tanto destaca menos, porque la vegetación de ribera tiene una respuesta parecida. Igualmente este análogo presenta una forma circular y aquí si se detecta una respuesta del agua en el centro.

Los valores de ratios de los píxeles correspondientes a los análogos naturales mencionados se eligieron para realizar una reclasificación de la imagen y determinar las zonas con posibilidades de presentar emisiones de CO₂.

7.3.3. Identificación de indicios de emisiones a través de la reclasificación de imágenes.

Los datos obtenidos anteriormente reflejan la relación existente entre los análogos naturales y su interacción en las zonas del infrarrojo del EEM. Sin embargo la relación no es exclusiva de estos sistemas, ya que se encuentra íntimamente relacionado con la vegetación y el contenido de humedad. A pesar de ello, esta relación es capaz de discernir entre los millones de píxeles que conforman una imagen unos cuantos miles que tengan una alta posibilidad de presentar emisiones de CO₂.

Este planteamiento sustenta la finalidad de la reclasificación de las imágenes. Antes de realizar la reclasificación de las imágenes, se tiene que considerar lo siguiente:

- Extraer los valores correspondientes a cada ratio de los píxeles asociados a los análogos naturales.
- Establecer clases o conjuntos, a partir de los anteriores, para determinar el grado de similitud con los análogos naturales.

Tabla 19. Rangos de valores para la reclasificación de las imágenes obtenidas de los ratios.

	Conjunto (valor reclasificado)									
	0		1		2		1		0	
Ratio A	Límite inferior	0,700	0,700	0,750	0,750	0,850	0,850	0,900	0,900	Límite superior
Ratio B		0,095	0,095	0,120	0,120	0,180	0,180	0,205	0,205	
Ratio C		0,050	0,050	0,100	0,100	0,300	0,300	0,350	0,350	

En esta investigación, los valores de ratio en los análogos naturales se encontraban en rangos similares para los dos primeros ratios, en cambio en el ratio C si había más variabilidad de los datos. Los valores de los análogos naturales más cercanos se agruparon en un conjunto específico para ratio.

Figura 65. Diagrama de flujo de la reclasificación de los ratios para señalar las posibilidades de emisiones de CO₂.

Este primer grupo de datos recibió la mayor ponderación, indicando la alta posibilidad de presentar emisiones de CO₂. A partir de esto se establecieron otros dos conjuntos de datos, que al alejarse de este se redujo su ponderación al indicar menos posibilidades de asociarse a una emisión. Cada conjunto recibió un nuevo valor, que en el proceso de reclasificación sería asignado a cada píxel. En la tabla 19 se mencionan los rangos de valores para cada ratio.

El procedimiento de reclasificación se realizó en el software ArcGIS. Los datos de la tabla 19 se introdujeron en diferentes herramientas del programa que generaron una nueva imagen basada en los parámetros de la reclasificación (ver figura 65).

El producto final está constituido por una imagen a partir de la sumatoria de los nuevos valores de píxeles, que posteriormente podría ser utilizado para elaborar cartografía temática. Los datos nuevamente fueron transformados a una misma escala, abarcando desde el 0 hasta 6, de tal forma que se pudo unificar y acumular el aporte que cada ratio hace en la identificación de indicios de fugas. La nueva imagen obtenida realza principalmente zonas de vegetación asociadas a fuentes de agua.

Figura 66. Fragmento de la imagen de indicios de emisiones de fugas de gases de Campo de Calatrava para el año 2011.

En la figura 66 los valores desde el 4 al 6, señalados en rojos y naranjas, representan a los píxeles que tienen valores similares a los puntos de emisiones conocidos. Esta clasificación resultó similar a la realizada por algunos índices de vegetación, como el NDVI, ya que está muy sustentado en la vegetación. No obstante existen diferencias respecto a éstos. Según el objetivo propuesto, resultan más precisos los índices elaborados por la investigación, que otros ejemplos, ya que descartan mucha de la vegetación circundante y las zonas de cultivo.

Los sistemas de agua con las fugas de gases y la vegetación más aledaña a estos resaltan considerablemente en la imagen reclasificada. Además cabe mencionar, que los análogos naturales conocidos, tales como los ubicados en las zonas de Barranco Pequeño y Baño Chico, están asociados a características geológicas. Este hecho apoya la idea de buscar indicios en una zona con características similares, tales como la cercanía a las fallas, el origen de los materiales rocosos, y estructuras destacables.

7.3.3.1. Determinación de los puntos con emisiones de CO₂.

A partir de la imagen reclasificada se realizó una selección de puntos señalados como zonas de alta probabilidad de emisión de gases, en total fueron 55 puntos que se detallan en el anexo 11. Es importante destacar que la identificación de puntos ameritó una interpretación de los elementos presentes en el entorno asociados a posibles indicios de emisiones. Además de apoyarse en la información complementaria (ver capítulo 5) para realizar la selección.

Un caso muy llamativo es el río Jabalón, donde habitan especies vegetales que también se encuentran en los análogos naturales. En la imagen reclasificada aparecen valores señalando la máxima posibilidad de emisiones, sin embargo muchas de estas zonas corresponden a la vegetación asociada a algunos análogos naturales sin tener que estar asociados a fugas de gases.

Otra situación que se aprecia consiste en grupos de píxeles con elevada posibilidad de presentar emisiones, rodeados de zonas con cero posibilidades. En un principio se podría considerar como un punto de emisión, pero una vez realizada una comparación con informaciones complementarias, como por ejemplo una fotografía aérea del PNOA, la imagen señala claramente a árboles, como el quercus o el almendro.

Una de las herramientas más útiles para apoyarse en la selección de puntos son las imágenes aéreas de alta resolución espacial, ya que los elementos de la zona se aprecian con más detalle y permitían diferenciar a estos entre sí. Por ejemplo una agrupación de píxeles con alta probabilidad señalada en la imagen reclasificada, fue contrastada con la fotografía aérea del PNOA (ver anexo 3) identificando un árbol grande y frondoso que no correspondía a una zona de fuga. A pesar de estos falsos positivos, en la imagen si se han detectado zonas de emisiones.

7.3.3.2. Validación de la presencia de emisiones de CO₂.

A efectos de corroborar la eficacia de la identificación de los indicios de fugas de CO₂, entre los meses de septiembre y noviembre de 2016 se organizaron dos visitas a la zona de estudio para realizar mediciones de CO₂ en puntos señalados por la imagen

reclasificada. Además se evaluaron las características de los sitios seleccionados. En la tabla 20 se señalan las zonas visitadas, sus características y las mediciones obtenidas.

Tabla 20 Relación de puntos seleccionados observados durante dos campañas de campo e 22-09-16 y 03-11-16.

Zona (Fecha de Visita)	Descripción	Id	Coordenadas UTM WGS-84		Conc. (ppm)
			X	Y	
Arroyo del Palomarejo (22-09-2016) (03-11-2016)	Escorrentía cercana al río Jabalón, ubicada entre dos olivares. Tiene su origen en una colina a aproximadamente 200 m al noreste. Al momento de la visita no se observó agua superficial, en cambio había una cobertura vegetal de arbustos.	6	429354,16	4295158,34	700
		7	429353,89	4295196,97	900
		8	429342,51	4295340,74	800
		9	429352,03	4295272,44	720
Solar adyacente a la carretera CM-4111 (22-09-2016)	Solar sin uso definido. Se observaron montículos de escombros de construcción y otros desechos. En una depresión se observó vegetación silvestre y algunas liebres.	11	428272,15	4294641,64	500
Hervidero en las riberas del río Jabalón. Zona A (03-11-2016)	Tres conjuntos de vegetación de ribera dispuesta en forma circular. En el centro se observaron orificios cercanos a las raíces de las plantas. El día de la visita no se presenció agua superficial.	19	425928,38	4298099,55	1000
		56	425958,43	4298076,07	1800
		57	425984,04	4298057,54	700
Posible hervidero (22-09-2016)	Indicios de vegetación cercana al río Jabalón. El día de la visita no se observó vegetación y solo suelo arado. Uno de los puntos correspondía a un pozo de agua	22	430062,96	4292316,4	500
		23	430273,98	4291146,01	500
		24	430267,55	4291316,51	500
		25	430183,30	4291516,46	500
Posible hervidero en el campo cerca de arroyo (22-09-2016)	Indicios de una escorrentía entre los campos de cultivo (olivares). Al momento de la visita no se visualizó vegetación y el terreno se apreció alterado por las actividades agrícolas.	26	428860,35	4291962,13	500
		27	428798,44	4291983,56	500
		28	428638,10	4292044,68	500
Arroyo el Canalón (22-09-2016)	Escorrentía entre los campos de cultivos con presencia de arbustos silvestres. En algunos partes las actividades agrícolas han nivelado el terreno.	29	428485,41	4292607,48	500
		30	428810,19	4292516,43	500
		31	428621,28	4292572,79	500
Posible hervidero ribera oeste río Jabalón (22-09-2016)	Comunidad de vegetación de ribera dispuesta en forma circular, a menos de 20m del río Jabalón. Al momento de la visita no se observó agujeros o agua en el centro.	47	426337,46	4297680,5	500
Árbol aledaño al río Jabalón (22-09-2016)	Árbol de 10m de altura aprox. Aledaño al río. No se observó evidencia de emisiones ni formaciones de vegetación asociada.	48	426365,42	4297665,18	500
Cima de colina (22-09-2016)	Gruta ubicada en una colina a 100m o menos del río Jabalón. Se encontraron restos de algunos animales (serpiente).	49	426424,96	4297729,94	500
Posible hervidero ribera este río Jabalón. Zona B (22-09-2016)	Comunidades de vegetación de ribera dispuesta en forma circular, a menos de 30 metros del río Jabalón. No se evidencian agujeros ni agua al momento de la visita.	50	426314,66	4297549,92	600
		58	426305,83	4297548,59	730
		59	426320,74	4297558,47	650

Figura 67. Arroyo Palomarejo (superior), hervideros en las riberas del río Jabalón zona a (centro) y zona b (inferior).

Las mediciones se realizaron con el detector portátil de CO₂ Telaire (ver anexo 7). El procedimiento consistió en:

- Ubicar grietas u orificios en el suelo, de donde posiblemente emanen los gases. Se tomó especial atención en aquellas zonas donde la vegetación se encontraba agrupada.
- Acceder a la zona central de las masas de vegetación.
- Explorar la zona para identificar alguna formación o características similares a los análogos conocidos.
- Realizar las mediciones a nivel del suelo, entre 5 a 10 cm de altura, cercano a grietas u orificios visibles. En caso contrario se retiraba la capa superficial del suelo y se adquirían mediciones también.

Es importante mencionar que el detector de CO₂ registraba valores de 500 ppm en espacios abiertos los días de la visita. Estos valores son ligeramente más altos que las concentraciones de CO₂ promedio¹¹ en el aire (400 ppm aproximadamente), presumiblemente debido a que el metabolismo¹² de la vegetación generaba más CO₂. También podría deberse a las características geológicas de la zona y a la desgasificación que se produce en la misma.

Del listado de la tabla 20, tres zonas de la selección de puntos registraron niveles de emisiones de CO₂ por encima de 500ppm. Estas fueron las zonas identificadas como Arroyo de Palomarejo, y dos zonas (a y b) de posibles hervideros en las riberas del río Jabalón (figura 67).

7.3.3.2.1. Apoyo de la información geológica y cartográfica.

Las fallas, materiales y estructuras de origen volcánico, están asociados a fugas de gases, entre ellos el CO₂. A partir de esta premisa, en el campo de Calatrava, se tomó interés en unas áreas particulares, que fueron delimitadas con ayuda de la carta geológica de la zona. Entre ellas destacan las zonas de colinas al norte del embalse del río Jabalón y el cauce del río Jabalón. Específicamente se prestó atención a las fallas, a las zonas de rocas volcánicas, y a las estructuras identificadas como: explosiones hidromagmáticas, estructuras como cráteres de explosión, cono volcánico con cráter, borde de cráter de explosión hidromagmática. Los análogos naturales conocidos están asociados a las características geológicas. Las zonas de Barranco Pequeño y Baño Chico se localizan cercanas al río Jabalón, y la Sima se encuentra cerca de unas fallas en la zona de las colinas al este del río. Este hecho apoya la idea de buscar indicios en una zona con características similares.

La localización de las fallas se obtuvo de la información complementaria del mapa geológico (ver anexo 5), aunque hay que considerar el margen de error de esta

¹¹ Valores basados en las mediciones promedio de CO₂ atmosférico medidas en Mauna Loa (Hawai, EEUU) por la División de Monitorización Global de NOAA (NOAA, S.f. <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/>).

¹² Aquellos procesos químicos que participan en las funciones vitales de las plantas. Los procesos más importantes consisten en la fotosíntesis, la respiración, el transporte de solutos, la translocación, la síntesis de proteínas, la asimilación de nutrientes, la diferenciación de tejidos. En general la formación de carbohidratos, lípidos y proteínas que intervienen en estos procesos o son parte estructural de las plantas (Taiz, L., y Zeiger, E., 2006).

representación. Una falla en la naturaleza no se presenta como una línea recta, tal como se representa en la cartografía temática, sino que consiste en segmentos distribuidos a lo largo de una zona. Por ello algunas fracturas en la roca pueden dirigir los gases hacia la superficie, como la señalada en la imagen, generando un sistema de emisiones difusas y más difíciles de detectar.

Durante la campaña de campo se realizó la adquisición de dos fotografías aéreas con el dron Phantom 3, cuyas especificaciones técnicas se detallan en el anexo 12. En el mismo anexo se puede apreciar, sobre los productos fotográficos obtenidos con el dron, las formaciones vegetales y la distribución de estos con mayor detalle. Cabe destacar que la potencialidad de las aplicaciones de los drones en este tipo de investigaciones resulta novedoso, ya que tiene la capacidad de ofrecer mayor detalle en la interpretación e identificación de los análogos naturales. Además que las posibilidades aumentan considerablemente con el uso de sensores multiespectrales e hiperespectrales en estos artefactos.

7.3.3.2.2. Mediciones realizadas en “Arroyo Palomarejo”.

El arroyo Palomarejo se caracterizó por la presencia de abundante vegetación (gramínea) en plena floración en septiembre de 2016, es decir que estaría en sus últimas fases de desarrollo, dado que en la visita de noviembre del mismo año, las plantas ya estaban secas. Además de la vegetación del género *Scirpus* y *Juncus*, que su presencia alejados del río Jabalón llama la atención, ya que son especies asociadas a cuerpos de agua.

La zona seleccionada se visualiza, delimitada por la elipse morada en la figura 68, rodeada de un camino de tierra y se distinguen los olivares a ambos lados, no obstante en la imagen reclasificada resalta la vegetación silvestre respecto a los olivares. Esto hace presumir que al momento de la adquisición de las imágenes, la vegetación estaba en una fase de crecimiento y estado verde, por lo tanto esta característica se reflejó en las imágenes AHS.

Figura 68. Arroyo de Palomarejo. Fotografía área del PNOA (izq.) y la imagen reclasificada (der.)

Las aglomeraciones de plantas dejaban entrever pequeños espacios entre sí y a estas zonas se accedió para realizar las mediciones de CO_2 . En el momento de instalación del detector al nivel del suelo, se registraron valores elevados de concentración, que en un principio presumiblemente se deben a una acumulación del gas producto de la actividad microbiana del suelo y al efecto de encapsulamiento que generaba la densidad de la vegetación. Por tal razón, se agitó el aire del área para ventear el gas y el detector registro un descenso de la concentración hasta 500 ppm aproximadamente. Al cabo de unos 5 minutos, los valores del detector aumentaron progresivamente durante otros 10 min en promedio más hasta alcanzar concentraciones entre 700 a 900 ppm (ver figura 6).

Figura 69. Medición de concentraciones de CO_2 en hervidero zona a (izq.) y arroyo Palomarejo (der.)

No obstante las lecturas del equipo no se mantenían constantes y oscilaban entre valores superiores a 500 ppm y los picos registrados. En los puntos 19 y 57 de la zona A de hervideros (tabla 20) también se observó este comportamiento.

7.3.3.2.3. Mediciones realizadas en hervidero húmedo de la zona A.

Los posibles hervideros de la zona A también se pueden caracterizar por su cercanía a un sistema de fallas, similar al arroyo Palomarejo, que está asociado a la trayectoria del río Jabalón. Igualmente por la presencia de vegetación, aunque de distintos géneros, ya que predomina la vegetación de los géneros *Scirpus* y *Juncus*. Estas especies se agrupan ocupando superficies circulares y sobresalen por su altura superior (2 m) al resto de gramíneas. Algunas masas de vegetación presentan un centro sin plantas y con agujeros cercanos a las raíces, donde no se observa agua. Si se observan fenómenos de agrupaciones de especies de juncos asociadas a puntos de emisión difusas de CO₂. Es posible que al momento de adquisición de la imagen (junio de 2011), este hervidero estuviera cubierto de agua y se apreciara burbujeo. La zona explorada se encuentra delimitada por la elipse morada en la figura 70.

Figura 70. Hervideros en las riberas del río Jabalón (Zona A). Fotografía área del PNOA (izq.) y la imagen reclasificada (der.)

Siguiendo el procedimiento descrito anteriormente, el detector se colocó lo más cercano posible a estos agujeros para realizar las mediciones. Al cabo de unos 5 minutos las concentraciones de CO₂ registradas por el detector se elevaron hasta un máximo de 1800 ppm, durante el tiempo de medición, en el punto 56 (tabla 20). Este punto tenía la peculiaridad de que las mediciones oscilaban menos que en el arroyo Palomarejo y no descendían de los 1500 ppm durante los 10 min que el detector estuvo registrando concentraciones. Esto permitió deducir que este hervidero tiene emisiones más

constantes. En las paredes del orificio se observaron pequeñas manchas blancas, que presumiblemente sean debidas hongos relacionados con las raíces de los juncos.

En la figura 70 se observa como la fotografía aérea del PNOA ayudó a diferenciar zonas de árboles y del río, identificados con altas probabilidades de presentar fugas, de los hervideros presentes. Al norte de la zona seleccionada se visualizan píxeles reclasificados en rojos y amarillos que representan al punto identificados por Gutiérrez del Olmo, J. (2015), señalados con una elipse roja, que presenta características parecidas a los hervideros localizados en esta investigación.

Durante la campaña de campo también se observaron otras masas vegetales similares al punto 56, que no fueron señalados claramente en la imagen reclasificada ni se apreciaron con detalle en las fotografías aéreas. Los puntos 19 y 57 se identificaron al observar la semejanza que mantenían con el punto 56, tanto por el tipo de vegetación presente como por su distribución, aunque sus dimensiones eran menores (diámetro=2m), tal como indica la tabla 20, en estos puntos también se registraron concentraciones de CO₂ superiores a los 1000 ppm que se mantenían estables sobre este valor y con pocas oscilaciones.

7.3.3.2.3. Mediciones realizadas en hervidero húmedo de la zona B.

La zona identificada como hervideros de la zona B se visitó según lo señalado en la imagen reclasificada de la figura 71, además por la cercanía a una falla a esta zona. En esta zona fueron identificadas formaciones vegetales, agrupadas en formas elípticas y rodeadas por pastizales más bajos y menos verdes, muy parecidas a aquellas halladas en la zona A. Las comunidades vegetales que presentaban una forma regular y estaban más alejadas de las riberas del río, se eligieron para realizar las mediciones. La zona explorada se encuentra delimitada por la elipse morada en la figura 71.

Al igual que en los hervideros de la zona A, se accedió a la zona central de las agrupaciones para tomar mediciones de concentración. Cabe destacar que en estas zonas tampoco se observaron agua ni agujeros identificables. Se retiró la parte superior de la maleza y suelo y se colocó el detector. Las concentraciones obtenidas no fueron tan elevadas como las registradas en la zona, no obstante se mantuvieron en un rango

superior a las 700 ppm en el punto 58 y sobre los 600 ppm en los puntos 50 y 59 (tabla 20). Este sistema se ha considerado que tiene similitudes al observado en el arroyo Palomarejo dado que las emisiones se produjeron en menores cantidades y distribuidas de forma no uniforme.

Figura 71. Hervideros en las riberas del río Jabalón (Zona B). Fotografía área del PNOA (izq.) y la imagen reclasificada (der.)

Las elipses negras, de la figura 71, señalan puntos, que fueron seleccionados porque los píxeles reclasificados asignaron altas posibilidades de presentar indicios. Sin embargo, durante la campaña de campo, fueron descartados o no presentaron indicios de emisiones. Uno de los punto corresponde a un árbol de grandes dimensiones, lo que hace pensar que su selección se debió a un error en la interpretación de la imagen aérea. Mientras que el otro punto tiene la forma elíptica de la agrupación de vegetación, no obstante al realizar las mediciones no se obtuvieron valores por encima de los 500 ppm.

7.3.3.3. Consideraciones a la selección de bandas y elaboración de ratios entre bandas espectrales.

La propuesta elaborada a partir de la identificación de bandas espectrales por el ACP, ha resultado satisfactoria, ya que fue capaz de discernir la vegetación de los cultivos y parte considerable de la vegetación silvestre respecto a la vegetación asociada a los análogos naturales. Esta capacidad resulta muy interesante porque gran parte de la cobertura terrestre de la zona de estudio se dedica a esta actividad. Además si se considera un

emplazamiento de almacenamiento geológico, que estarían localizados en zonas alejadas de los centros urbanos, dicha técnica reduciría en buena parte las zonas para detectar indicios de emisiones de CO₂.

A pesar de que algunas zonas elegidas no correspondieron a zonas de emisiones, los falsos positivos obtenidos se debieron a errores en la interpretación de la información complementaria. Otro factor que originó falsos positivos está relacionado con las alteraciones generadas en la superficie terrestre, especialmente en zonas como solares de terrenos o escorrentías intermitentes hacia el río Jabalón.

Dado que las imágenes fueron adquiridas después de la primavera, las precipitaciones de esta época fomentaron el desarrollo de la vegetación silvestre. Por lo tanto, las imágenes hiperespectrales manifestaron esas características de plantas en desarrollo y crecimiento. En consecuencia, la comparación de las imágenes con información previa o posterior puede ser diferente. Esta situación se manifestó en el arroyo Canalón y otros no identificados (puntos 26 – 31), ya que la imagen reclasificada ofreció altas posibilidades de encontrar indicios. Sin embargo en el arroyo, durante la visita de campo, no se apreciaron cauces ni vegetación relacionada con una escorrentía, ya que el terreno fue intervenido para las labores agrícolas de los olivares.

CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES

Un proyecto de CAC abarca muchas fases y disciplinas. Estas trabajan entre sí para cumplir unos objetivos comunes, respecto a la mitigación de los efectos del cambio climático. Las localizaciones elegidas para el almacenamiento, normalmente están alejadas de los centros urbanos densamente poblados. Además que deben cumplir con una serie de requisitos que garanticen la efectividad del almacenamiento y el cumplimiento de las medidas de seguridad y protección del medio ambiente. Por estas razones la monitorización de posibles fugas del CO₂ del subsuelo es parte fundamental de la fase de inyección del gas.

Esta idea inicial plantea la necesidad de elaborar estrategias de monitorización de fugas de CO₂. Las técnicas de teledetección se perfilan como una opción para las actividades de control en un primer nivel, ya que son capaces de obtener datos sobre un emplazamiento a una escala grande (que puede ser de kilómetros cuadrados) en poco tiempo.

8.1 Conclusiones.

Ante la situación planteada, esta investigación tuvo como objetivo principal evaluar la monitorización de un emplazamiento de almacenamiento geológico, mediante técnicas de teledetección hiperespectral. La observación de las características de puntos de emisiones de CO₂ conocidos, en la zona volcánica de Campo de Calatrava, Ciudad Real – España., permitió determinar opciones aplicables en futuros emplazamientos. Los resultados obtenidos en esta investigación arrojaron las siguientes conclusiones:

1. Se han aplicado los métodos de pretratamiento de las imágenes hiperespectrales propuestos en la literatura para la obtención de reflectancias a partir de las imágenes de radiancia adquiridas. Su aplicación se ajusta a los requisitos demandados para su posterior aplicación en las metodologías propuestas.
2. Los dos métodos de corrección atmosférica considerados (QUAC Y FLAASH) realizaron un ajuste adecuado según los indicadores calculados. Las radiancias de las imágenes se convirtieron a valores de reflectancia cercanos a aquellos registrados en las firmas espectrales de referencia para coberturas determinadas.

3. El método QUAC fue más eficiente en aquellos píxeles que representan a la vegetación. Mientras que el método FLAASH lo fue en los píxeles que representaban las coberturas mezcladas, en especial las asociadas a los análogos naturales.
4. Se han realizado dos propuestas de análisis estadístico de la información presente en imágenes hiperespectrales para la detección de posibles zonas de anomalías asociadas a la existencia de emanaciones de CO₂. La propuesta A basada en el análisis de todas las bandas espectrales y aplicación de las correlaciones cruzadas y propuesta B basada en la selección de bandas por Análisis de Componentes Principales y elaboración de ratios entre Bandas.
5. La propuesta A mostró efectividad para realizar clasificaciones utilizando firmas espectrales de un material conocido. Sin embargo, no destaca zonas con indicios de emisiones de CO₂. Es posible que las emisiones en Campo de Calatrava no posean un caudal suficiente para ser detectable por esta metodología.
6. La propuesta B ha demostrado mayor eficiencia para detectar zonas con posibles indicios de fugas de CO₂.
7. La metodología propuesta ha permitido identificar algunas regiones del EEM, que recopilan datos sobre la detección de fugas de CO₂ de forma indirecta. Las zonas espectrales donde se manifiesta una mayor variabilidad de datos, pertenecen a las zonas del infrarrojo cercano y el infrarrojo medio. Las bandas de estas zonas espectrales están íntimamente relacionados a las características de la vegetación y a su comportamiento en diferentes longitudes de onda. Además señalan la vegetación asociada a fuentes de aguas superficiales o subterráneas.
8. Los ratios entre bandas elaborados, una vez unidos en la composición en falso color, reflejan la relación entre la presencia de vegetación y los contenidos de agua. Estos ratios tienen la capacidad de diferenciar los cultivos agrícolas respecto a la vegetación silvestre y de río (juncos, gramíneas), a diferencia de algunos índices de vegetación como el NDVI. Los ratios son aplicables, en caso de que surjan emisiones, usando los valores de longitud de onda recomendados. Esto permite resaltar píxeles asociados a emisiones relacionados con cambios de vegetación y asociados a una fuente de humedad.

9. El uso de los sistemas de información geográfica (SIG) ayuda a los responsables de la monitorización a relacionar todos los datos recopilados. Estos programas permiten combinar las propiedades ligadas a los datos, basados en la posición geográfica, y generar nueva información que ayude en la toma de decisiones.
10. Los aspectos geológicos más relevantes están determinados principalmente por las fallas, ya que representan las vías de migración de los gases hacia la superficie. Las zonas que fueron determinadas con posible presencia de emisiones de gases, se encontraban asociadas a sistemas de fallas del río Jabalón. La cartografía temática geológica permitió centrar el análisis en zonas específicas.
11. La metodología propuesta, en particular la propuesta B, ha sido validada mediante la caracterización “in situ” de las posibles localizaciones de emisiones por el análisis estadístico de las imágenes hiperespectrales.
12. A partir del análisis de las imágenes se identificaron 55 puntos de posible emanación de CO₂, de los cuales fueron examinados en campo 24 distribuidos en 10 zonas.
13. De las 10 zonas analizadas en 3 de ellas se detectaron niveles ligeramente superiores a los normales, lo que confirma la existencia de emisiones. Las zonas diferenciadas, se denominan:
 - a) Arroyo de Palomarejo.
 - b) Posible hervidero en las riberas del río Jabalón. Zona A
 - c) Posible hervidero en las riberas del río Jabalón. Zona B
14. La zona del Arroyo de Palomarejo presenta características de emisiones difusas. Estas se caracterizaron por la distribución de emisiones en varios puntos de la zona y por baja concentración de CO₂, hasta un máximo de 900 ppm registrado en un punto. Además no fue posible evidenciar un punto en concreto de emisión determinado por aglomeraciones de vegetación rodeando una charca.
15. Las zonas A y B presentan agrupaciones de vegetación de forma circular, en cuyo centro se apreciaban evidencias de existir charcas y orificios. Estos círculos a su vez se encuentran rodeados de otras especies vegetales más bajas y menos verdes, por lo que resaltan de estas. En estos casos las concentraciones de CO₂ pueden ser más elevadas, habiéndose medido hasta un máximo de 1800 ppm en un punto.

16. La validación por observación in situ de los puntos identificados indica que la metodología propuesta parece ser adecuada para la localización de posibles puntos de fuga de CO₂, siendo necesario recurrir a otras tecnologías posteriores para ratificar su existencia y para cuantificar las emisiones.

A partir de estas conclusiones se determina que la combinación de métodos de análisis de imágenes hiperespectrales, ampliamente estudiados y conocidos como el análisis de componentes principales y los ratios entre bandas, resulta provechosa para la monitorización de fugas de CO₂. La obtención de la información a partir de las propias imágenes permitió prescindir de las firmas espectrales, lo cual se traduce en ahorro de costos. Además que facilita el procedimiento de análisis de las imágenes para aquellos usuarios que no sean expertos en la materia.

La extensión territorial del emplazamiento determina en gran medida la planificación de las medidas de monitorización. Los indicios de fugas determinados, según los análogos naturales observados y en la bibliografía, suelen tener dimensiones de 4 m o menores. Por lo tanto la resolución espacial de las imágenes debe ser menor que la cifra anterior, al menos 2 m o inferior, para que sea capaz de distinguir estos indicios respecto al resto de elementos de la cobertura terrestre.

Posiblemente los futuros emplazamientos de almacenamiento geológico no presenten zonas de emisiones de CO₂ conocidas, a través de las cuales se puedan localizar indicios de fugas. Esto se debe a que las mismas quizás surgirán con el paso del tiempo, una vez iniciada la inyección del gas. Por lo tanto la utilización de técnicas de teledetección para la monitorización de los cambios ayudará a identificar si se manifiestan indicios de fugas, en conjunto con estudios de línea base.

8.2. Recomendaciones y futuras líneas de investigación.

Los resultados y conclusiones de esta investigación demuestran el cumplimiento del objetivo planteado. No obstante a lo largo del estudio se encontraron con aspectos capaces de mejorar los resultados obtenidos. Este resultado representa una oportunidad para profundizar el desarrollo de otras líneas de investigación relacionadas con la monitorización de emisiones de CO₂.

8.2.1. Elaboración de Estudios de Línea Base previos a la inyección de CO₂.

En primer lugar, es necesario definir un estudio de línea base, donde se realice una caracterización previa de los componentes bióticos y abióticos del entorno del emplazamiento. Los aspectos más importantes a determinar serían:

- el tipo de vegetación,
- el relieve y la geología,
- la hidrografía e hidrogeología,
- los usos de suelo y
- las infraestructuras relacionadas con perforaciones en el suelo.

Estos elementos están relacionados, directa e indirectamente, con las emisiones de CO₂ y la detección de estas. Además identifican zonas que sean propensas a la generación o como entes facilitadores de que se produzcan las fugas. Las variables del estudio de línea base sirven como punto de referencia para detectar cambios en las labores de monitorización con los datos adquiridos por teledetección.

Conocidos los grandes aspectos, se identifican las variables que se deben monitorizar. A partir de estos se pueden hacer mediciones y comparaciones de los elementos que presenten cambios respecto a los datos iniciales. Los cambios, especialmente en la vegetación, tienen un componente estacional que influye en estos, por lo tanto se tienen que considerar como condiciones iniciales los ciclos de algunas de las variables.

De este análisis inicial resulta importante identificar las especies vegetales existentes y sus propiedades, puesto que estas puedan proliferar, desplazarse o verse afectadas ante las emisiones.

8.2.2. Adición de segundo nivel de adquisición de datos remotos.

Una estrategia de monitorización podría consistir en utilizar imágenes satelitales o aeroportadas como un primer nivel de búsqueda, basados en la frecuencia descrita anteriormente, y seleccionar zonas específicas dentro del área del emplazamiento.

Posteriormente los drones podrían mejorar la búsqueda de indicios en las zonas previamente seleccionadas con una mayor frecuencia de adquisición de datos. Los drones constituyen una opción bastante efectiva para la recolección de datos, porque su relación coste beneficio es muy ventajosa y puede resultar más efectiva que las imágenes aeroportadas o las satelitales.

Entre los beneficios de los drones destacan que la inversión económica inicial otorga autonomía y propiedad sobre los medios para la obtención de datos, además que ofrece un nivel de detalle considerablemente alto según el equipamiento. A pesar de estas ventajas, su aplicación está limitada a la extensión territorial del emplazamiento, por lo tanto se plantea como segundo nivel de búsqueda previo al empleo de técnicas in situ de mediciones de flujo de gases.

8.2.3. Definición de una resolución temporal adecuada durante la monitorización.

La periodicidad de adquisición de datos es fundamental para detectar cambios. En este sentido existen varios aspectos que condicionan la frecuencia ideal en la monitorización. La ubicación del emplazamiento influye sobre algunos factores geográficos (clima y relieve), que modifican la vegetación y la disponibilidad de agua. A grandes rasgos, se puede establecer un criterio de adquisición de datos remotos entre las zonas tropicales y templadas, basado en los siguientes aspectos:

- Las regiones de las zonas templadas deberían considerar al menos una campaña de adquisición de datos para cada estación del año, en otras palabras, cada cuatro meses.
- Las zonas tropicales deberían ajustar las campañas de adquisición, según las temporadas de lluvia y sequía.

Estas condicionantes se deben a que la vegetación y disponibilidad de agua varían a lo largo del año en diferentes condiciones y como consecuencia se originan variaciones en la sensibilidad de los ratios planteados.

8.2.4. Interpretación de los datos adquiridos de la vegetación.

Otros índices de vegetación podrían resultar útiles para detectar los cambios de vegetación que no sean detectados por los índices propuestos en este estudio. Un ejemplo de ello es el NDVI, que puede ser utilizado cuando surjan manifestaciones de la vegetación como crecimientos abruptos o, por el contrario, ausencias de esta. Esta aplicación es de especial interés en los puntos de emisiones secos, ya que los índices propuestos están estrechamente relacionados con una fuente de humedad.

En lo que se refiere a las formas de la distribución de las plantas, se debe tener especial atención con este fenómeno, porque se observó que algunos tenían formas elípticas en cuyo centro podría estar presente una charca con agua o no.

La identificación de formas podría mejorar la automatización del proceso de monitorización. Estas técnicas permitirían descartar zonas cuyos píxeles no se ajustan a unas características y formas determinadas, tal como ha demostrado la experiencia en esta y otras investigaciones. A pesar de que estos procedimientos resultan complejos, lo más adecuado sería adoptar un enfoque mixto entre una clasificación supervisada y automatizada.

8.2.5. Ampliación de la información complementaria.

Cada emplazamiento es único por sus características geológicas y la capacidad de almacenamiento de gases, por lo que las predicciones sobre la evolución del desplazamiento del CO₂, deben ser evaluadas en cada caso particular.

La información que ofrezcan los modelos sobre el comportamiento de los gases inyectados en el subsuelo, ayudará a determinar las fases y frecuencia necesaria de obtención de datos para la detección de cambios en la superficie. Por esta razón, las actividades de monitorización se podrían planificar durante periodos de tiempo que no estén relacionados con el inicio de la fase de inyección. Por ejemplo, si los modelos predicen que la migración del gas hasta la roca sello se produce en cierta cantidad de tiempo, entonces se pueden planificar el inicio de las labores de monitorización en esos momentos y no necesariamente desde el inicio de la inyección.

Además de la geología existen elementos antrópicos que generan rutas de fugas. Entre ellos destacan los pozos, sondeos, piezómetros y cualquier otra perforación en el suelo. Es de vital importancia que estos elementos estén documentados, debido a que ellos mismos y sus alrededores son puntos que se relacionan con rutas para el escape de gases de forma puntual o difusa.

CHAPTER 8. CONCLUSIONS

A carbon capture and storage project (CAC) includes several phases and disciplines. They work together to accomplish common objectives regarding the mitigation of climate change effects. The selected sites for storage are normally located away from densely populated areas. Besides, they have to comply with a number of requirements that guarantee the effectiveness of storage and accomplishment of safety and environmental actions. Therefore, considering the previous ideas, the monitoring of possible CO₂ leaks from underground are a fundamental part of the injection phase.

This initial idea states the need to elaborate monitoring strategies for CO₂ leaks. Remote sensing techniques are an option outlined as a first level control. They are capable of gathering data over a site at a large scale (square kilometers) in a short time.

8.1. Conclusions.

Given the situation, this research had as main objective to evaluate the monitoring of a geologic storage site through hyperspectral remote sensing techniques. The observation of the characteristics of CO₂ leakage spots (at the volcanic area Campo de Calatrava) allowed determining applicable options in future sites. The results in this research featured the following conclusions:

1. The preprocessing methods for hyperspectral imagery proposed in literature were applied obtaining reflectance values from the radiance data. Their application adjusts to the terms needed for further use.
2. The considered atmospheric corrections method (QUAC and FLAASH) performed an adequate adjustment of the imagery according to the calculated indicators. The radiance values were converted to reflectance, very close to the values registered in the spectral signatures of specific land covers.
3. The QUAC method was more efficient in those pixels portraying vegetation. Whilst the FLAASH method was in pixels representing mixed lands covers, especially in those associated to the natural analogues.
4. Two statistical proposals were done for the analysis of the data in the hyperspectral imagery, aiming the detection of possible anomalies zones related to CO₂ emissions. The A proposal was based in the analysis of all the spectral

bands and the application of cross-correlograms. Whilst the B proposal was centered in the prior selection of bands by Principal Components Analysis and in the construction of Band Ratios.

5. Proposal A proved effective to classify pixels with the spectral signatures of a known material. However, it did not highlight areas with CO₂ emissions. It is possible the emissions in the Campo de Calatrava area are undetectable by this method due to a low flux rate.
6. Proposal B showed more efficiency detecting areas with possible indications of CO₂ leaks than proposal A.
7. The methodology B identified regions of the electromagnetic spectrum that gather data about the indirect detections of CO₂ emissions. The spectral regions near infrared (NIR) and medium infrared (MIR) had a greater variability of the data than the visible region. The bands selected in these regions are related to the characteristics of vegetation and their response at different wavelengths. In addition, they point out the vegetation associated to a superficial or underground water source.
8. The band ratios, once combined in a false color composition, display the relationship between vegetation and presence of water. These ratios differentiate crops from natural vegetation and other water plants (grasses and reeds), unlike other vegetation indexes such as NDVI. In case an emission spot appears, the ratios can be used with the recommend wavelengths. Thus, highlighting pixels related to vegetation change and a water source.
9. The uses of Geographic Information Systems (GIS) allows monitoring managers to gather and relate data. The software combines properties of the data, based on geographic location, and generates new information to help in decision-making.
10. Faults are the most relevant geologic features, because they represent the migration paths of gases to the surface. The zones determined with possible gas leakage areas were found associated to the fault systems along the Jabalón River. The geologic cartography allowed centering the analysis in specific areas.
11. In situ measurements of several spots validated the methodology of proposal B of locating emissions by statistical analysis of hyperspectral imagery.

12. Ten possible emission zones were identified from the imagery analysis.
13. Three out of ten areas registered measurements of CO₂ concentration slightly higher than normal values, thus confirming the presence of emissions. The zones are:
 - a) Palomarejo Creek.
 - b) Possible spot near Jabalón River banks. Zone A
 - c) Possible spot near Jabalón River banks. Zone B
14. The Palomarejo Creek presented characteristics of diffuse emissions. These were featured by several emission points distributed in the area and low concentrations of CO₂, up to 900 ppm in one point. In addition, it was not observed a puddle surrounded by reeds and grasses.
15. Zonas A and B had vegetation in a circular distribution. Their center presented evidences of orifices and former puddles. Other lower and less green vegetation species surrounded the formations, which distinguish themselves. Here the CO₂ concentrations registered higher values, reaching up to 1800 ppm in one point.
16. Validation by in situ observation of identified points indicated the methodology properly locates possible CO₂ leakage points. It would be necessary the use of other techniques to ratify the leak and quantify it.

The conclusions determined that the combination of well-known and studied methods of hyperspectral imagery analysis (such as Principal Component Analysis and Band Ratios) proved useful for CO₂ leak monitoring. Data analysis from the imagery allowed disregarding spectral signatures, which translates into saving costs. Besides, eases the analysis procedure of the imagery for unexperienced users in this area.

The territorial extension of the storage site determines largely the monitoring planning. The leak indications have dimensions around 4 m or less, according to the natural analogues observed and the references. Therefore, the spatial resolution of the imagery should be at least 2 m or less, in order to distinguish properly the indications on leakage over other land covers.

Future geologic storage sites probably will not present most known emissions zones, which can help locate unknown indications of leakage. Due to the leakage may appear with the passage of time once the gas injection begins. Hence, remote sensing

techniques to monitor change will help identify leakage indications starting from a base line study.

8.2. Future investigations.

The results and conclusions of this research prove the objectives were fulfilled. However, the study has margin for improvement of the results. This gives opportunities to deepen investigations related to CO₂ emissions monitoring.

8.2.1. Base Line Study formulation before CO₂ injection.

In the first place, it is necessary to define a base line study. The biotic and abiotic components in the surroundings of the site should be investigated. The most important aspects to define are:

- Vegetation type
- Relief and geology
- Hydrology and hydrogeology
- Soils and land use
- Infrastructures related to soil drillings.

The detection of CO₂ emissions relates to these elements directly or indirectly. In addition, they help identifying areas susceptible to generate or facilitate leakage. The variables of the base line study are useful as a reference point to detect change during monitoring activities in remotely sensed data.

The monitoring variables are identified from the categories previously mentioned. From these it is possible to gather data, and then compare the changes in them from the initial information. The changes, especially in vegetation, have a seasonal component. Thus, some of the cycles need to be considered as initial conditions.

8.2.2. Second Level of data gathering by remote sensing.

One monitoring strategy could consist in the use of satellite or airborne imagery as a first scanning level. The acquisition frequency should be pursued as stated previously. From this information, the monitoring protocol delimitates specific zones.

Afterwards, the use of imagery from drones could improve the detection of indications of leakage at the delimited areas by an increment in the frequency of the data acquisition. Drones are an effective option for data gathering. They have an attractive cost-benefit relationship and they could outperform satellite or airborne imagery.

The initial economic investment provides advantages, among which stand the autonomy and property of the data acquisition means. Besides, drones offer a considerably highly detailed imagery dependent on the equipment used. However, its use is limited to the territorial extension of the site; therefore, it should be considered as a second scanning level.

8.2.3. Definition of a temporal resolution during the monitoring.

The periodicity of data acquisition is fundamental to detect changes. Several aspects condition the ideal frequency for monitoring. The location of the site determines some geographic factors (weather and relief), which influence vegetation and water availability. Broadly, an acquisition criterion is proposed between tropical and template areas, based on:

- In template regions, the frequency should consider a yearly acquisition campaign with at least one per season. In other words, every four months.
- In tropical zones, the acquisition campaign should adjust to the rainy and dry seasons.

Along the year, vegetation and water availability have different conditions. These can cause variations in the sensibility of the proposed band ratios.

8.2.4. Interpretation of the data from vegetation.

Other vegetation indexes, such as NDVI, could be useful to detect vegetation changes not detected by the band ratios proposed in this research. It is possible that vegetation displays arise, such as abrupt growth or, on the contrary, the absence of it. This application is of special interest over dry emissions points, since the proposed band ratios are sensitive to a water source.

Regarding plant distribution, special attention should be taken in account. Some distributions had an elliptic shape and in their center had a puddle of water or not.

The identification of shapes could improve the automatization of the monitoring process. These techniques could allow discarding areas whose pixels did not adjust to specific shapes and characteristics, as observed in other experiences and investigations. Because these processes are complex, the identification of indications should consider a mixed scope between unsupervised and supervised classification.

8.2.5. Extension of complementary information.

Every site is unique due to its geologic characteristics and the gas storage capacity. The models of CO₂ movement in the storage site should be evaluated individually.

The information from the models contributes to determine the phases and frequencies to detect changes on the surface of the site. Hence, the planning of monitoring activities could consider time lapses unrelated to initial phase of injection.

For example, if the models predict the migration of gas to the top seal rock begins at certain time, the monitoring activities could start in that moment and not necessarily from the beginning of the injection.

Besides geology, other anthropic elements exist that produce escape routes for the gas. Among them stand out wells, drills, piezometer, and any other perforation in the ground. It is important these elements are well documented and located, because they and their surroundings are spots related with gas escape routes, either diffuse or punctual.

9. Referencias bibliográficas

- Adler-Golden, S. M., Matthew, M. W., Bernstein, L. S., Levine, R. Y., Berk, A., Richtsmeier, S.C., Acharya, P. K., Anderson, G. P., Felde, G., Gardner, J., Hoke, M., Jeong, L. S., Pukall, B., Ratkowski, A., Burke, H.-H. (1999). *Atmospheric Correction for Short-wave Spectral Imagery Based on MODTRAN4*. SPIE Proceedings on Imaging Spectrometry. Vol. 3753. Páginas: 61-69.
- AEMET: Agencia Estatal de Meteorología. [En línea]. Disponible en: <http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/datosclimatologicos/valoresclimatologicos> [Acceso en: 15 de marzo de 2015]
- Ancochea, E. (1982). *Evolución espacial y temporal del vulcanismo reciente de España Central*. Tesis Doctoral, Universidad Complutense, Madrid, España. Colección Tesis Doctorales, 203/83. Páginas: 675
- Andersen, H. *Pre-combustion decarbonisation technology summary*. (2005). Capítulo 11 de Carbon Dioxide Capture for Storage in Deep Geologic Formations. Vol. 1. Elsevier Ltd. Páginas. 203 -211.
- Arts, R., Winthaege, P. *Monitoring Options for CO₂ Storage*. (2005). Capítulo 19 de Carbon Dioxide Capture for Storage in Deep Geologic Formations. Vol. 2. Elsevier Ltd., Páginas. 1001 - 1013.
- Bachu, S. (2003). *Screening and ranking of sedimentary basins for sequestration of CO₂ in geological media in response to climate change*. Environmental Geology.
- Bateson, L., Vellico, M., Beaubien, S., Pearce, J., Annunziatellis, A., Ciotoli, G., Coren, F., Lombardi, S., Marsh, S. (2008). *The application of remote-sensing techniques to monitor CO₂-storage sites for surface leakage: Method development and testing at Lateral (Italy) where naturally produced CO₂ is leaking to the atmosphere*. International Journal of Greenhouse Gas Control. Nº 2. Páginas: 388- 400.
- Bellante, G., Powell, S., Lawrence, R., Repasky, K., Dougher, T. (2013). *Aerial detection of a simulated CO₂ leak from a geologic sequestration site using hyperspectral imagery*. International Journal of Greenhouse Gas Control nº 13. Páginas. 124-137.
- Bernstein, L., Adler-Golden S., Sundberg, R., Levine, T., Perkins T., Berk, A., Ratkowski, G., Felde, G., Hoke, L. (2005). *Validation of the QUick atmospheric correction (QUAC) algorithm for VNIR-SWIR multi- and hyperspectral imagery*. Proceedings of the Society of Photo Optical Instrumentation engineers (SPIE). Volumen: 5806. Páginas: 668-678 .DOI: 10.1117/12.603359
- Buchwitz, M., de Beek, R., Burrows J. P., Bovensmann, H., Warneke, T., Notholt, J., Meirink, J. F., Goede, A.P.H., Beramascit, P., Körner, S., Heinmann, M., Schulz, A. (2005). *Atmospheric Methane and carbon dioxide from SCIAMACHY satellite data: initial comparison with chemistry and transport models*. Atmospheric Chemistry and Physics. Volumen: 5. Páginas: 941 – 962.
- Bustamante, J., Aragones, D., Afán, I., Díaz-Delgado, R. (2015). *Métodos de corrección atmosférica en imágenes aeroportadas hiperespectrales: una comparación en las marismas de Doñana*. Congreso de la Asociación Española de Teledetección 2015. Sevilla.

Chávez, P. (1988). *An Improved Dark-Object Subtraction Technique for Atmospheric Scattering Correction of Multispectral Data*. U.S. Geological Survey. Remote Sensing of Environment 24. Páginas: 459-479

Chuvieco, E. (2015). *Teledetección ambiental: la observación de la Tierra desde el espacio*. Editorial Planeta. Barcelona, España. ISBN: 978-84-344-3498-1.

Comisión Europea. (2009). DIRECTIVA 2009/31/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO,» Diario Oficial de la Unión Europea.

EIAGHG: International Energy Agency Green House Gas Program. (2012). Quantification Techniques for CO₂ Leakage.

EIAGHG: International Energy Agency Green House Gas Program R&D Programme. (2014). *Carbon Capture and Storage: Proven and it works*.

EIA: International Energy Agency. (2013). World Energy Outlook 2013 Factsheet. [En línea]. Disponible en: http://www.worldenergyoutlook.org/media/weoweb/site/factsheets/WEO2013_Factsheets.pdf. [Acceso en: febrero de 2014.]

Eide, L. (2005). *Precombustion Decarbonisation Processes*. Journal of Oil & Gas Science and Technology. Vol. 60. Nº 3, Páginas. 475-484.

Eimer, D. (2005). *Post-Combustion CO₂ Separation*. Capítulo 4 de Carbon Dioxide Capture for Storage in Deep Geologic Formations. Vol. 1. Elsevier Ltd. Páginas: 91-97.

Elío J., M.F. Ortega, E. Chacón, L.F. Mazadiego, F. Grandía. (2012) *Sampling strategies using the "accumulation chamber" for monitoring geological storage of CO₂*. International Journal of Greenhouse Gas Control 9. Páginas: 303–311.

Elío, J., Ortega, M.F., Nisi, B., Mazadiego, L.F., Vaselli, O., Caballero, J., Grandía, F., (2015). *CO₂ and Rn degassing from the natural analogue of Campo de Calatrava (Spain): implications for monitoring of CO₂ storage sites*. International Journal Greenhouse Gas Control. Volumen: 32. Páginas: 1–14.

Emirate Steel Company. Corporate Responsibility - Environment - CO₂ capture project. [En línea]. Disponible: <http://www.emiratessteel.com/index.php/en/corporate-responsibility/environmental/co2-capture-project>. [Acceso en: Marzo de 2014].

ENDESA; CIUDEN; Foster Wheeler. (2013). *OXYCFB300 Compostilla - Carbon Capture and Storage Demonstration Project. Knowledge Sharing FEED Report*.

ESA: European Space Agency. [En línea]. Available: <http://www.esa.int/ESA>. [Último acceso: 12 Abril 2014].

Feng, Q., He, B. (2016). *Mapping of the hydrothermal mineral alteration zones using aster data*. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Páginas: 802-805.

Global CCS Institute. (2014). *The Global Status of CCS*. [En línea]. Disponible en: <http://www.globalccsinstitute.com/publications/global-status-ccs-february-2014?highlight=pdf>. [Acceso en: marzo de 2015].

González, E., Ubaldo, R., Becerra-Ramírez, R., Escobar, E. (2010). *Evidencias de actividad hidromagmática de Edad Holocena en el volcán Columba, Campo de Calatrava (España)*. Grupo de Investigación GEOVOL. Dpto. Geografía y Ordenación del Territorio, UCLM. Ciudad Real

Govindan, R., Korre, A., Durucan, S., Imrie, C. R. (2010). *A geostatistical and probabilistic spectral image processing methodology for monitoring potential CO₂ leakages on the surface*. International Journal of Greenhouse Gas Control. Número: 5. Páginas: 589 – 597.

Gutiérrez del Olmo, J. (2015). *Monitorización de emisiones de CO₂ en análogos naturales de almacenamientos geológicos a través de la vegetación mediante técnicas de teledetección multiespectral*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. Madrid, España. Páginas: 294

Heggum, G., Weydahl, T., Mo, R., Mølvik, M., Austegaard, A. (2005). *CO₂ Conditioning and Transportation*. Capítulo 15 de Carbon Dioxide Capture for Storage in Deep Geologic Formations. Vol. 2. Elsevier Ltd. Páginas: 925-936.

Hernández, E., Herranz, J., eds. (2011). *Protección de la diversidad vegetal de los recursos fitogenéticos en Castilla – La Mancha: La perspectiva existente y el compromiso del Jardín Botánico*. Instituto de Estudios Albacetenses “Don Juan Manuel” y Jardín Botánico de Castilla-La Mancha. Albacete, España. Páginas: 496.

Higueras, P. (1997). *Las rocas ígneas de Almadén*. [En línea]. Disponible en: <http://www.uclm.es/users/higueras/Tema/RIA.htm>. [Acceso en: septiembre de 2013].

IGN: Instituto Geográfico Nacional. [En línea]. Disponible en: <http://www.ign.es/ign/main/index.do>. [Acceso en: mayo de 2014].

IGME: Instituto geológico y Minero de España. [En línea]. Disponible en: <http://www.igme.es/> [Acceso en: julio 2015]

INE: Instituto Nacional de Estadística. [En línea]. Disponible en: <http://www.ine.es/>. [Acceso en: marzo de 2015].

IPCC: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (2005). *La captación y el almacenamiento de dióxido de carbono: Resumen para responsables de políticas*.

IPCC: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (2007). *Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*, R. Pachauri, A. Reisinger y (. d. l. publicación). Edits. Ginebra.

JC-CLM: Junta de Comunidades de Castilla – La Mancha, Consejería de Agricultura, Dirección General de Montes y Espacios Naturales. (2013). *Documento 1: Diagnóstico del Espacio Natura 2000. Plan de gestión de “Lagunas Volcánicas del Campo de Calatrava, ES4220005 (Ciudad Real)”*.

Jolliffe, I. T. (2002). *Principal Component Analysis*. Springer. Segunda edición. ISBN: 0-387-95442-2.

Kruse, F. A., A. B. Lefkoff, J. B. Boardman, K. B. Heidebrecht, A. T. Shapiro, P. J. Barloon, and A. F. H. Goetz. (1993). *The Spectral Image Processing System (SIPS) - Interactive Visualization and Analysis of Imaging spectrometer Data*. Remote Sensing of the Environment, v. 44, p. 145 - 163.

Lichtenhaler, H. (1996). *The stress concept in plants: an introduction*. Journal of Plant Physiology. Vol. 148. Páginas. 4 – 14.

Male, E. J., Pickles, W. L., Silver, E. A., Hoffman, G. D., Lewicki, J., Apple, M., Repasky, K., Burton, E. A. (2010). *Using hyperspectral plant signatures for CO₂ leak detection during the 2008 ZERT CO₂ sequestration field experiment in Bozeman, Montana*. Journal of Environmental Earth Science. Número: 60. Páginas. 251 – 261.

Martínez, J., Monje, L., Peinado M. (2008) *El paisaje vegetal de Castilla-La Mancha: manual de geobotánica*. Editorial IV Centenario, S.L. ISBN 8493651826. Páginas 612.

McCloy, K. R. (2006). *Resource Management Information Systems: Remote Sensing, GIS and Modelling*. Segunda edición. Taylor & Francis Group.

Miracca, I., Aasen, K. I., Brownscombe, T., Gerdes, K., Simmonds, M. (2005). *Oxyfuel Combustion for CO₂ Capture Technology summary*. Capítulo 25 de Carbon Dioxide Capture for Storage in Deep Geologic Formations. Volumen 1. Elsevier Ltd. Páginas. 441-449.

NOAA: National Oceanic & Atmospheric Administration. *NOAA Solar Calculator*. [En línea]. Disponible en: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/grad/solcalc/> [Acceso en: abril de 2013]

ONU: Organización de Naciones Unidas. (2014). *United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC)*. [En línea]. Disponible en: <http://unfccc.int>. [Acceso en: marzo de 2015].

Peña, D. (2008). Fundamentos de estadística. Alianza Editorial. Páginas: 683. ISBN: 9788420683805

Pruess, K. (2006). *On CO₂ Behavior in the Subsurface, Following Leakage from a Geologic Storage Reservoir*. Número de Reporte: LBNL-59628.

R Core Team (2013). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. [En línea]. Disponible en: <http://www.R-project.org/> [Acceso en: mayo 2016].

Riding, J.B., Rochelle, C. A. (2005). *The IEA Weyburn CO₂ Monitoring and Storage Project. Final Report of the European Research Team*. British Geological Survey Research Report: RR/05/03 54pp.

Rivas-Martínez, S. (1987): *Nociones sobre Fitosociología, Biogeografía y Bioclimatología*. In: Peinado, M. & S. Rivas-Martínez (eds) La vegetación de España: 19-45. Ed

Rivas-Martínez, S. (2001): *Mapa bioclimático de Europa: Bioclimas, escala 1:16 mill.* Servicio de Cartografía, Universidad de León.

Rivas-Martínez, S. (2004): *Globalbioclimatics*. [En línea] Disponible en: <http://www.globalbioclimatics.org> [Acceso en: octubre de 2015]

Rouse, J. H., Shaw, J. A., Lawrence, R. L., Lewicki, J. L., Dobeck, L. M., Repasky, K. S., Spangler, L. H. (2010). *Multispectral imaging of vegetation for detecting CO₂ leaking from underground*. Environmental Earth Science.

Shuler, P., Tang, Y. (2005) *Atmospheric CO₂ monitoring systems*. Capítulo 20 de Carbon Dioxide Capture for Storage in Deep Geologic Formations. Vol. 2. Elsevier Ltd. Páginas. 1015-1030.

Smith, J. C. Kelly-Snyder Oilfield. [En línea]. Disponible en: <http://www.tshaonline.org/handbook/online/articles/doksu>. [Último acceso: 21 Marzo 2014]. Cargado: 15 de junio de 2010. Publicado por Texas State Historical Association

Sobрино, J. A. ed. (2000). *Teledetección*. Universitat de València. España. ISBN: 8437042208

Spangler, L. A. (2009). *Controlled field pilot for testing near surface CO₂ detection techniques and transport models*. Energy Procedia. Volumen: 1. Páginas. 2143-2150.

Statoil. Technology & Innovation - New Energy - Carbon Capture and Storage,. [En línea]. Disponible en: <http://www.statoil.com/en/TechnologyInnovation/NewEnergy/Co2CaptureStorage/Pages/SleipnerVest.aspx>. [Acceso en: 25 de marzo de 2014].

Taiz, L., Zeiger, E. (2006). *Plant Physiology*. Sinauer Associates. Inc. Cuarta edición.

Tucker, C. J. (1979). *Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation*. Remote Sensing of Environment. Volumen: 8. Páginas: 127-150.

Ubaldo, R., Becerra-Ramírez, R., González, E. (2010). *Evolución de la emisión de CO₂ en La Sima. Campo de Calatrava (España)*. Grupo de Investigación GEOVOL. Dpto. Geografía y Ordenación del Territorio, UCLM. Ciudad Real

USGS: US Geological Survey. Landsat Project Description. [En línea]. Disponible en: <http://landsat.usgs.gov>. [Acceso en: junio de 2013].

Van der Meer, F., W. Bakker, W. (1997). *CCSM: Cross correlogram spectral matching*. International Journal of Remote Sensing. Volume 18. Issue 5. Páginas: 1197-1201

Vangkilde-Pedersen, T., Kirk, K., Smith, N., Maurand, N., Wojcicki, A., Neele, F., Hendriks, C., M. Le Nindre, Y., Lyng Anthonsen, K. (2009). *Assesing European Capacity for Geological Storage of Carbon Dioxide*.

Vera, J. A (editor). 2004. *Geología de España*. SGE-IGME. Madrid. 890 páginas.

Wang, M., Lawal, A., Stephenson, P., Sidders, J., Ramshaw, C. (2011). *Post-combustion CO₂ capture with chemical absorption: A state-of-the-art review*. Chemical Engineering Research and Design. Número: 89. Páginas: 1609–1624.

Zarco - Tejada, P. J. (1998). *Correlations between CO₂ fluxes and high spatial resolution reflectance imagery*. Master of Science in Remote Sensing. University of Dundee (Scotland, United Kingdom).

FLAASH™, SMACC and QUAC® are licensed from Spectral Sciences, Inc. under U.S. Patent No. 6,909,815 and U.S. Patent No. 7,046,852 B2.

ANEXOS

Anexo 1. Listado de las imágenes hiperespectrales adquiridas por el INTA y procedimientos de tratamiento.

Lab. de Adquisición de Datos de TD Área de Teledetección Dpto. Observación de la Tierra, TD y Atmósfera Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial	Contenido: Informe de campaña Versión: 1 Fecha: 2011/Junio/06 Archivo: CAMCAL2011.FR.E1.doc Sustituye a: N/A Docs. ref.: CAMCAL2011.*
---	---	--

Página 2

VUELO DIURNO 2

Fecha: 02 de junio de 2011
Meteorología: Despejado. Viento fuerte del NE (corrección deriva 3° - 4°)
 Turbulencia fuerte en pasadas bajas (5400FT MSL)
Descripción: Pasada diurnas P11, P12, P14 y P13 a partir de 10:49UTC a 12050FT MSL.
 Pasadas P08 a P01 a 5400FT MSL a partir de 11:39UTC.

IDENTIFICACIÓN PASADA	IDENTIFICACIÓN REGISTRO AHS	HORA (UTC)	ALTITUD (MSL)	RUMBO VERD.	LONG./DURACIÓN (GS 72m s ⁻¹ 140KTS)	AHS-FREC. BARRIDO	CONFIG. CASI-1500i	NOTAS
P11 CASI20110602-SPEC144-P11 AHS20110602D-12.5-P11	DATA06 F20	10:49	12250FT (3734m)	322°	11.0km/2min33s	12.5 Hz	ESPECTRAL 144 bandas RS=2 IT=22ms Apertura máxima	Despejado. Viento cruzado de la derecha (NE) T ₈₀₁ =281K T ₈₀₂ =318K Se realiza a 12250FT MSL
P12 CASI20110602-SPEC144-P12 AHS20110602D-12.5-P12	DATA06 F21	10:59	12250FT (3734m)	142°	11.0km/2min33s	12.5 Hz	ESPECTRAL 144 bandas RS=2 IT=22ms Apertura máxima	Viento cruzado variable. Variaciones de GS (Ground Speed) hasta alcanzar 150KTS. Se realiza a 12250FT MSL
P14 CASI20110602-SPEC144-P14 AHS20110602D-12.5-P14	DATA06 F22	11:08	12050FT (3673m)	336°	11.0km/2min33s	12.5 Hz	ESPECTRAL 144 bandas RS=2 IT=22ms Apertura máxima	Despejado. 3-4 grados de deriva.
P13 CASI20110602-SPEC144-P13 AHS20110602D-12.5-P13	DATA06 F23	11:16	12050FT (3673m)	142°	11.0km/2min33s	12.5 Hz	ESPECTRAL 144 bandas RS=2 IT=22ms Apertura máxima	Viento cruzado variable. Variaciones de GS hasta 150KTS. 3-4 grados de deriva.
P08 AHS20110602D-35-P08 CASI20110602-SPEC144-P08	DATA06 F24	11:39	5400FT (1646m)	360°	10.0km/2min19s	35 Hz	ESPECTRAL 144 bandas RS=2 IT=22ms Apertura máxima	Despejado. Viento cruzado variable de NE. Turbulencias. 3-4 grados de deriva. T ₈₀₁ =292K T ₈₀₂ =318K
P07 AHS20110602D-35-P07 CASI20110602-SPEC144-P07	DATA06 F25	11:47	5400FT (1646m)	180°	10.0km/2min19s	35 Hz	ESPECTRAL 144 bandas RS=2 IT=22ms Apertura máxima	Despejado. Viento cruzado variable de NE. Turbulencias. Variaciones de GS hasta 153KTS 3-4 grados de deriva. T ₈₀₁ =283K T ₈₀₂ =318K
P06 AHS20110602D-35-P06 CASI20110602-SPEC144-P06	DATA06 F26	11:55	5400FT (1646m)	360°	10.0km/2min19s	35 Hz	ESPECTRAL 144 bandas RS=2 IT=22ms Apertura máxima	Despejado. Viento cruzado variable de NE. Turbulencias. 3-4 grados de deriva.
P05 AHS20110602D-35-P05 CASI20110602-SPEC144-P05	DATA06 F27	12:16	5400FT (1646m)	180°	10.0km/2min19s	35 Hz	ESPECTRAL 144 bandas RS=2 IT=22ms Apertura máxima	Espera de 15 minutos por tráfico en aeropuerto de Ciudad Real. Despejado. Viento cruzado variable de NE. Turbulencias. 3-4 grados de deriva.
P04 AHS20110602D-35-P04 CASI20110602-SPEC144-P04	DATA06 F28	12:25	5400FT (1646m)	360°	10.0km/2min19s	35 Hz	ESPECTRAL 144 bandas RS=2 IT=22ms Apertura máxima	Despejado. Viento cruzado variable de NE. Turbulencias. 3-4 grados de deriva.
P03 AHS20110602D-35-P03 CASI20110602-SPEC144-P03	DATA06 F29	12:33	5400FT (1646m)	180°	10.0km/2min19s	35 Hz	ESPECTRAL 144 bandas RS=2 IT=22ms Apertura máxima	Despejado. Viento cruzado variable de NE. Turbulencias. Variaciones de GS 130-160KTS 3-4 grados de deriva.
P02 AHS20110602D-35-P02 CASI20110602-SPEC144-P02	DATA06 F30	12:42	5400FT (1646m)	360°	10.0km/2min19s	35 Hz	ESPECTRAL 144 bandas RS=2 IT=22ms Apertura máxima	Despejado. Turbulencias. Viento cruzado variable de NE. 3-4 grados de deriva. Desviación 100 m a derecha por viento.
P01 AHS20110602D-35-P01 CASI20110602-SPEC144-P01	DATA06 F31	12:50	5400FT (1646m)	180°	10.0km/2min19s	35 Hz	ESPECTRAL 144 bandas RS=2 IT=22ms Apertura máxima	Despejado. Viento cruzado variable de NE. Turbulencias. Variaciones de GS. 3-4 grados de deriva.

Imágenes de radiancia del sensor AHS

Datum: WGS 1984. Sistema de proyección: UTM. Huso 30.

EPSG: 32.630

Fuente de información: imágenes adquiridas al
Insituto Nacional de Técnica Aeroespacial

Fecha de adquisición: 6 de junio de 2011.

Escala:

Imagen P13AD de radiancia del sensor AHS

Imagen P12AD de radiancia del sensor AHS

Imagen P11AD de radiancia del sensor AHS

Imagen P14AD de radiancia del sensor AHS

Imágenes de radiancia del sensor CASI 1500i

Datum: WGS 1984. Sistema de proyección: UTM. Huso 30.

EPSG: 32.630

Fuente de información: imágenes adquiridas al
Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial

Fecha de adquisición: 6 de junio de 2011.

Escala:

Imagen P11ED de radiancia del sensor CASI 1500i

Datum: WGS 1984. Sistema de proyección: UTM. Huso 30.
EPSG: 32.630
Fuente de información: imágenes adquiridas al
Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial
Fecha de adquisición: 6 de junio de 2011.

Escala:
0 0.5 1 2 3 4
1:40,000 km

Imagen P12ED de radiancia del sensor CASI 1500i

Datum: WGS 1984. Sistema de proyección: UTM. Huso 30.
EPSG: 32.630

Fuente de información: imágenes adquiridas al
Insituto Nacional de Técnica Aeroespacial
Fecha de adquisición: 6 de junio de 2011.

Escala:

Imagen P13ED de radiancia del sensor CASI 1500i

Datum: WGS 1984. Sistema de proyección: UTM. Huso 30.
EPSG: 32.630
Fuente de información: imágenes adquiridas al
Insituto Nacional de Técnica Aeroespacial
Fecha de adquisición: 6 de junio de 2011.

Escala:
0 0.5 1 2 3 4
1:40,000
km

Imagen P14ED de radiancia del sensor CASI 1500i

Datum: WGS 1984. Sistema de proyección: UTM. Huso 30.
EPSG: 32.630

Fuente de información: imágenes adquiridas al
Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial
Fecha de adquisición: 6 de junio de 2011.

Escala:

Anexo 2. Firmas espectrales de referencia medidas en campo con el espectrorradiómetro FieldSpec 3.

Ver en DVD-ROM.

Anexo 3. Ortofotografía del Campo de Calatrava. Fuente: Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA).

Anexo 4. Modelo digital del terreno (MDT) de Campo de Calatrava. Fuente: Instituto Geográfico Nacional (IGN).

Anexo 5. Datos y mapas geológicos de Campo de Calatrava. Fuente: Instituto Geológico y Minero de España (IGME).

CORRELACIÓN SECUENCIA DEPOSICIONAL

LITOLÓGICAS ZONA DE PROYECTO

Anexo 6. Mediciones de flujo de CO₂ en Campo de Calatrava. Fuente: Elío, J., 2015.

Ver en el DVD-ROM.

Anexo 7. Características y especificaciones técnicas del detector de CO₂ Telair.

Descripción general

El sensor portátil de dióxido de carbono (CO₂) Telaire 7001 presenta tecnología patentada de absorción de infrarrojos. El equipo toma medidas en tiempo real de temperatura y CO₂, además de tasas de ventilación. Al juntarse con el HOBO U12 o la serie ZW, es capaz de registrar CO₂ y al estar conectado a una entrada analógica en una serie H22, RX3000 o U30, puede registrar temperatura y CO₂. El Telaire viene con un adaptador pero también opera hasta 70 horas con 4 baterías AA (no incluidas).

Funciones destacadas

Registrar 0 hasta 2500 ppm cuando usa el CABLE-CO2 y una U12 o ZW

Registrar 0 hasta 4000 ppm cuando usa el CABLE-2070 y una H22 o U30

Adaptador de potencia AC incluido

¿Qué mediciones son compatibles con el sensor?

El sensor TEL-7001 es compatible con las siguientes mediciones: dióxido de carbono y temperatura.

El país de origen de este producto es México. Para ver las características completa de este producto, ver el manual del producto encontrado bajo la pestaña de documentación si está disponible.

Rango de medición

Usando el CABLE-CO2 y una U12 o ZW: 0 hasta 2500 ppm

Usando el CABLE-2070 y una H22 o U30: 0 hasta 4000 ppm

Rango de operación del Telaire 7001: 32°F hasta 122°F (0°C hasta 50°C), 0 ha 95% HR, no condensante

Resolución: ± 1 ppm

Precisión: ± 50 ppm o 5% de lectura, el que sea mayor

Repetitividad: ± 20 ppm

Dependencia de temperatura: $\pm 0,1\%$ de lectura por °C o ± 2 ppm por °C , el que sea mayor, referenciado a 25°C.

Dependencia de presión: 0.13% de lectura por mmHg (corregido vía entrada de elevación por el usuario).

Tiempo de respuesta: <60 segundos para 90% de cambio de paso.

Tiempo de calentamiento: <60 segundos a 72°F (22°C)

Intervalo de calibración: 12 meses. Calibración completa de fábrica disponible contactando [GE Measurement & Control Solutions](http://www.ge.com/mcs).

Tipo de batería: cuatro baterías AA (no incluidas)

Operación con baterías: 80 horas (alcalinas)

Disponible en: <http://www.onsetcomp.com/>

Anexo 8. Imágenes en reflectancia con las correcciones radiométricas de las imágenes P01BD a P08BD del sensor AHS.

Imágenes P01BD-P08BD en reflectancia con corrección radiométrica del sensor AHS Zona Campo de Calatrava

Anexo 9. Imágenes en composición en falso color de los ratios entre bandas calculados en la propuesta B.

Imágenes AHS en falso color de los ratios entre bandas

R: B19-B25/B19+B25 G: B19-B13/B19+B13 B: B31-B27/B31+B27

Datum: WGS 1984. Sistema de proyección: UTM. Huso 30.
EPSG: 32.630

Fuente de información: imágenes adquiridas al
Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial
Fecha de adquisición: 6 de junio de 2011.

Escala:
0 0.5 1 2 3 4
1:40,000 km

Índice de vegetación de diferencia normalizada Imágenes AHS

Anexo 11. Imágenes AHS reclasificadas indicando zonas de emisiones de CO₂ identificadas por la propuesta B.

Relación de puntos identificados (0 = Punto no visitado).

ID	Identifica	Zona	X	Y	Conc. (ppm)
1	Posible hervidero	Barranco Pequeño	429270.144	4294367.3	0
2	Posible hervidero	Barranco Pequeño	429206.643	4294366.24	0
3	Posible hervidero	Barranco Pequeño	429152.933	4294515.1	0
4	Posible hervidero	Barranco Pequeño	429161.4	4294597.65	0
5	Hervidero	Barranco Pequeño	429168.808	4294548.96	0
6	Posible hervidero Arroyo del Palomarejo	Baño Chico	429354.162	4295158.34	700
7	Posible hervidero Arroyo del Palomarejo	Baño Chico	429353.898	4295196.97	900
8	Posible hervidero Arroyo del Palomarejo	Baño Chico	429342.511	4295340.74	800
9	Posible hervidero Arroyo del Palomarejo	Baño Chico	429352.036	4295272.44	720
10	Posible hervidero	Zona anegada del embalse	429089.776	4296780.78	0
11	vegetación muy verde en solar cerca CM-4111	Baño Chico	428272.159	4294641.64	500
12	posible hervidero cerca CM-4111	Baño Chico	427990.641	4294964.38	0
13	Posible hervidero al lado de CM-4111	Baño Chico	427532.797	4295102.39	0
15	Posible hervidero alejado de la carretera	Cañada Real Sur	424926.959	4297346.63	0
16	Posible emisión, cima de roca	Baño Chico	427373.306	4294774.39	0
18	Posible hervidero cerca de factoría	Cañada Real Sur	427291.31	4297918.3	0
19	Posible hervidero, rivera oeste cerca punto 14 JGO	Cañada Real Sur	425928.383	4298099.55	1000
20	Posible hervidero muy cerca del río	Cañada Real Sur	426536.538	4297070.21	0
21	Posible hervidero en arroyo cerca carretera	Cañada Real Sur	426756.666	4296470.18	0
22	Posible hervidero cercano al río	Alto Río Jabalón	430062.968	4292316.4	500
23	Posible hervidero cerca del río	Alto Río Jabalón	430273.987	4291146.01	500
24	Posible hervidero cerca del río	Alto Río Jabalón	430267.557	4291316.51	500
25	Posible hervidero cerca del río	Alto Río Jabalón	430183.3	4291516.46	500
26	Posible hervidero en el campo	Este Alto Río Jabalón	428860.355	4291962.13	500
27	Posible hervidero en el campo	Este Alto Río Jabalón	428798.442	4291983.56	500
28	Posible hervidero en el campo	Este Alto Río Jabalón	428638.104	4292044.68	500

29	Posible hervidero Arroyo el Canalón	Este Alto Río Jabalón	428485.413	4292607.48	500
30	Posible hervidero Arroyo el Canalón	Este Alto Río Jabalón	428810.196	4292516.43	500
31	Posible hervidero Arroyo el Canalón	Este Alto Río Jabalón	428621.283	4292572.79	500
32	Posible hervidero en charca	Cañada Real	426257.888	4300564.65	0
33	Posible hervidero cerca de charca	Cañada Real	426195.976	4300615.98	0
34	Posible hervidero	Zona anegada del embalse	430770.697	4296054.07	0
35	Posible hervidero	Zona anegada del embalse	431517.772	4293121.86	0
36	Posible hervidero	Zona anegada del embalse	431134.853	4293163.73	0
37	Posible hervidero	Zona anegada del embalse	431172.225	4293138.27	0
38	Posible hervidero	Zona anegada del embalse	430891.753	4293333.81	0
39	Posible hervidero	Zona anegada del embalse	430828.517	4293390.96	0
40	Posible hervidero	Zona anegada del embalse	430357.911	4293694.23	0
41	Posible hervidero	Zona anegada del embalse	430251.945	4293750.98	0
42	Árbol y estanque	llanura de Calatrava	430031.216	4299371.62	0
43	Posible Hervidero cerca salida de la carretera	Cañada Real Sur	425737.853	4297563.87	0
44	En la curva del camino cerca carretera	Cañada Real Sur	425751.082	4297500.63	0
47	Posible hervidero ribera oeste	Cañada Real Sur	426337.463	4297680.5	500
48	Posible Hervidero, intersección frente árbol	Cañada Real Sur	426365.424	4297665.18	500
49	Cima de Roca	Cañada Real Sur	426424.956	4297729.94	500
50	Posible hervidero ribera este río Jabalón	Cañada Real Sur	426314.664	4297549.92	600
51	Posible hervidero muy cerca del río	Cañada Real Sur	426313.535	4297300.1	0
52	Posible hervidero muy cerca del río	Cañada Real Sur	426246.754	4297371.61	0
53	Posible hervidero muy cerca del río	Cañada Real Sur	426264.587	4297336.66	0
54	Posible hervidero	Cañada Real Sur	426699.346	4296930.38	0
55	Posible hervidero	Zona anegada del embalse	429770.06	4293973.62	0
0	Posible hervidero, rivera oeste cerca punto 14 JGO	Cañada Real Sur	425958.438	4298076.07	1800
0	Posible hervidero, rivera oeste cerca punto 14 JGO	Cañada Real Sur	425984.041	4298057.54	700
0	Posible hervidero ribera oeste	Cañada Real Sur	426305.834	4297548.59	730
0	Posible hervidero ribera este río Jabalón	Cañada Real Sur	426320.74	4297558.47	650

Posibilidad de indicio de emisión de CO2 Imágenes AHS

Datum: WGS 84. Sistema de proyección: UTM. Huso 30.
EPSG: 32.630

Fuente de información: imágenes adquiridas al
Insituto Nacional de Técnica Aeroespacial
Fecha de adquisición: 6 de junio de 2011.

Posibilidad de indicio de emisión de CO2

Imágenes AHS

Zona Arroyo Palomarejo

Leyenda

Indicios de emisiones de gases

○ 1 2 3 4 5 6

— Fallas

○ Emisiones de CO2 (ppm)

Posibilidad de indicio de emisión de CO2

Imágenes AHS

Zona A - río Jabalón

Leyenda

Indicios de emisiones de gases

○ 1 2 3 4 5 6

— Fallas

○ Emisiones de CO2 (ppm)

Posibilidad de inicio de emisión de CO2 Imágenes AHS Zona B - río Jabalón

Leyenda

Indicios de emisiones de gases

0 1 2 3 4 5 6

Fallas

○ Emisiones de CO2 (ppm)
0 = no visitado. 500 ppm: promedio medición más baja

Escala:

1:3,000

Datum: WGS 84. Sistema de proyección: UTM. Huso 30.
EPSG: 32.630

Fuente de información: imágenes adquiridas al
Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial
Fecha de adquisición: 6 de junio de 2011.

Posibilidad de inicio de emisión de CO2 Imágenes AHS río Jabalón

Leyenda

Indicios de emisiones de gases

0 1 2 3 4 5 6

Fallas

○ Emisiones de CO2 (ppm)
0 = no visitado. 500 ppm: promedio medición más baja

Escala:

1:8,000

Datum: WGS 84. Sistema de proyección: UTM. Huso 30.
EPSG: 32.630

Fuente de información: imágenes adquiridas al
Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial
Fecha de adquisición: 6 de junio de 2011.

Anexo 12. Imagen de alta resolución del “Arroyo Palomarejo” y especificaciones técnicas del dron Phantom 3.

Phantom 3 Advanced. Especificaciones

Aeronave	
Peso (incluidas las baterías y propulsores)	1280 g
Velocidad máxima de ascenso	5 m/s
Velocidad máxima de descenso	3 m/s
Velocidad máxima	16 m/s (modo ATTI, sin viento)
Altura máxima sobre el nivel del mar	6000 m (límite de altitud según software: 120 m sobre el punto de despegue)
Tiempo de vuelo máximo	23 minutos aproximadamente
Temperatura de operación	0°C a 40°C
Modo GPS	GPS/GLONASS
Gimbal	
Rango controlable	Pitch: 0° a + 30°
Posicionamiento de visión	
Rango de velocidad	< 8 m/s (2m sobre la superficie)
Rango de altitud	30 cm – 300 cm
Rango de operación	30 cm – 300 cm
Ambiente de operación	Superficies estampadas iluminadas (lux > 15)
Cámara fotográfica	
Sensor	Sony EXMOR 1/2.3” Píxeles efectivos: 12.4 M (píxeles totales: 12.76 M)
Lente	FOV 94° 20mm (35mm formato equivalente) f/2.8
Rango ISO	100-3200 (vídeo) 100 – 1600 (foto)
Velocidad del disparador electrónico	8s – 1/8000s
Tamaño máximo de imagen	4000 x 3000
Modalidades de fotografía fija	Único Ráfaga: 3/5/7 marcos Exposición automática bracketing (AEB): 3/5 Bracketing de Marcos a 0.7 EV Bias Lapso de tiempo
Tarjetas SD aceptadas	Micro SD Capacidad máxima: 64 GB. Clasificación clase 10 o UHS-1 requerida.
Modalidades de grabación de vídeo	2.7K: 2704 x 1520p 24/25/30 (29.97) FHD: 1920 x 1080p 24/25/30/48/50/60 HD: 1280 x 720 p 24/25/30/48/50/60
Tasa de bit máxima de almacenamiento	40 Mbps
Formatos de archivo aceptados	FAT32/exFAT

	Foto: JPEG, DNG Video: MP4/MOV (MPEG-4 AVC/H.264)
Temperatura de operación	0°C a 40°C
Control remoto	
Frecuencia de operación	2.400 GHz – 2.483 GHz
Distancia de transmisión	Hasta 5 km o 3.1 millas (sin obstrucciones, libre de interferencias y cumpliendo FCC) cuando cumple con FCC Hasta 3.5 km o 2.1 millas (sin obstrucciones, libre de interferencias) cuando cumple con CE
Puerto de salida de vídeo	USB
Temperatura de operación	0°C a 40°C
Batería	6000 mAh LiPo 2S
Sujetador de dispositivos móviles	Tabletas y Smartphones
Transmisor de potencia (EIRP)	FCC: 20 dbm; CE: 16 dbm
Voltaje de operación	1.2 A @ 7.4 V
Cargador	
Voltaje	17.4 V
Potencia clasificada	57 W
Batería inteligente de vuelo (PH3-4480 mAh- 15.2 V)	
Capacidad	4480 mAh
Voltaje	15.2 V
Tipo de batería	LiPo 4S
Energía	68 Wh
Temperatura de operación	-10°C a 40°C
Potencia máxima de carga	100 W

Imagen de alta resolución de la zona “Arroyo Palomarejo”

Escala:
0 30 60 120 180
1:2,000 Metros

Datum: ETRS 89. Sistema de proyección: UTM.
Huso 30. EPSG: 25.830
Fuente de información: Dron Phantom 3.
Departamento de Ingeniería Geológica y Minera
ETSI Minas. UPM

Imagen de alta resolución de la zona A del río Jabalón

Escala:
0 15 30 60 90 120 150
Metros
1:1,500

Datum: ETRS 89. Sistema de proyección: UTM.
Huso 30. EPSG: 25.830
Fuente de información: Dron Phantom 3.
Departamento de Ingeniería Geológica y Minera
ETSI Minas. UPM