UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía

INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGRO-FORESTALES EN EL ECUADOR CONTINENTAL

TESIS DOCTORAL

Presentada para optar al título de Doctor por:

Francisco Darío Cabrera Torres
Ingeniero Geógrafo y del Medio Ambiente
Máster en Teledetección

Madrid, 2024

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
Escuela Técnica Superior de Ingenieros en
Topografía, Geodesia y Cartografía

Doctorado en Ingeniería Geomática

INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGRO-FORESTALES EN EL ECUADOR CONTINENTAL

TESIS DOCTORAL

Presentada para optar al título de Doctor por:

Francisco Darío Cabrera Torres
Ingeniero Geógrafo y del Medio Ambiente
Máster en Teledetección

Bajo la dirección de:
Dra. Mercedes Farjas Abadía
Dr. Juan Gregorio Rejas Ayuga

Madrid, 2024

Título: INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGRO-FORESTALES EN EL ECUADOR CONTINENTAL

Autor: Francisco Darío Cabrera Torres

Programa de Doctorado:Ingeniería Geomática

Dirección de tesis:

Dra. Mercedes Farjas Abadía, Catedrática de Escuela Universitaria, UPM (Directora)

Dr. Juan Gregorio Rejas Ayuga, Profesor Asociado, UPM (Codirector)

Revisores externos:

Tribunal de tesis:

Fecha de defensa:

"Esta tesis ha sido financiada por la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (SENESCYT) de Ecuador"

Dedicatoria

A Dios.

A mi esposa.

A mi hijo Ismael.

A mis padres.

A mis hermanos.

A mi familia.

A mis amigos.

A mi país.

Agradecimientos

A la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (SENESCYT), por la beca de estudios otorgada.

Al Instituto Geográfico Militar, Ecuador (IGM), por la autorización para efectuar mis estudios.

A la Universidad Politécnica de Madrid (UPM):

- A mis directores de tesis: Mercedes Farjas Abadía y Juan Gregorio Rejas Ayuga.
- Al Secretario del Programa de Doctorado: Antonio Vázquez Hoehne.
- A los docentes: César García Aranda, Abelardo Bethencourt, Pedro Sanz y César García Pérez, los cuales me permitieron ingresar como oyente a sus clases.
- Al personal de laboratorio de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía.

Al Grupo de Investigación en Geomática e Ingeniería Cartográfica (GEOINCA) de la Universidad de León, Campus de Ponferrada:

- Al catedrático de la Universidad, José Ramón Rodríguez Pérez, por su apoyo durante mis estancias en Ponferrada.
- Al personal de laboratorio: Karen Mejía Corral.

Al Grupo de Investigación de Fitorremediación (FITOUAM) de la Universidad Autónoma de Madrid (UAM):

- Al personal docente e investigador: Araceli Pérez Sanz y Teresa Fresno García, por su apoyo en los análisis químicos de las muestras recolectadas en España.

Al Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT):

- A los investigadores: Rocío Millán Gómez y Thomas Schmid Sutter, por su apoyo en los análisis químicos y orientación en temas de teledetección.
- Al personal de laboratorio: Ángel Palencia.

Al Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura (CEBAS) del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC):

- Al personal técnico, Francisco San Nicolás López, por su guía constante durante el envío de muestras y entrega de resultados de laboratorio.

Al Grupo de Investigación de Aplicaciones Geomáticas Avanzadas (AGA) de la UPM:

- Al docente e investigador, Sergio Álvarez Gallego, por su apoyo para poder integrar a tan prestigioso equipo.

Al Grupo IEEE-P4005, por haberme aceptado como parte de su gran equipo de trabajo.

A TEPRO Consultores Agrícolas S.L.:

- A la Jefa del Departamento de I+D+i, Concepción Mira Rodado, por su aprobación y apoyo durante las prácticas extracurriculares.

A AGRODATO S.L.:

- Al Director Ejecutivo, Pablo Morán Galcerán, por su aprobación y apoyo durante las prácticas extracurriculares.
- Al equipo técnico: María Navalpotro, José Martínez y Georgios Kapellakis.

A la *Agenzia Spaziale Italiana* (ASI), por su apoyo en la adquisición de las imágenes hiperespectrales PRISMA.

A la Universidad de las Fuerzas Armadas (ESPE):

- A los docentes: Ing. Oliva Atiaga Franco e Ing. Hugo Bonifaz García, por su apoyo en la preparación de las muestras recolectadas en Ecuador.
- Al personal de laboratorio: Carmen Arias Santos, César Fierro Fuentes, Damián Quishpe Muñoz y Nina Sivizaca Flores.

A la Universidad Técnica Estatal Quevedo (UTEQ):

- Al docente e investigador, Marco Heredia Rengel, por su apoyo durante las estancias realizadas.

A la Coordinación General del Sistema de Información Nacional (CGSIN) del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG):

- Al personal técnico: Blanca Simbaña y David Jácome, por el asesoramiento brindado al momento de definir el área de estudio en Ecuador.

A LUTOPSA S.A.:

- Al Director Ejecutivo, Marcelo Tabango Checa, por el préstamo de equipos para el trabajo de campo.

A las instituciones Veo-Veo, Mundo de Genios y San Gabriel por la oportunidad brindada a mi hijo para acceder a los distintos niveles de educación.

A todas las personas que han colaborado con un granito de arena en las diferentes etapas de esta investigación, por ejemplo: a mi suegro Pascual Astudillo, a mis amigos de barrio (Santiago, Christian y Ricardo), a mis compañeros de Universidad de Grado y Posgrado, y a mis compañeros de Trabajo.

¡Gracias infinitas!

Abstract

Over the past five years, the European Union has recorded annual import values exceeding $6 million in food products, with bananas, shrimp, and cocoa derivatives standing out. Germany, Belgium, Spain, France, the Netherlands, and Italy represent key export markets for these products from Ecuador. Sustaining and enhancing this economic activity, while ensuring compliance with Europe's stringent production and quality standards for agricultural products, necessitates monitoring the health status of agricultural operations at their origin before commercialization.

This doctoral thesis proposes an analytical method for detecting trace elements in agroforestry soils, involving the integration of geospatial technologies and multi-source data. Through these technologies, heavy metals are spectrally characterized, utilizing specific wavelengths relevant to the study of the issue. These wavelengths allow for the proposal and adjustment of vegetation indices and/or differential analysis of principal components, aiming to spatially identify these elements.

Following the theoretical study, experimental research was conducted in the Southeast Regional Park and the Guadalquivir River Valley in Spain. Additionally, technology transfer was carried out, leveraging the knowledge, skills, and tools acquired in Spain and applying them to Ecuador, specifically in the study area located between the towns of Francisco de Orellana and Shushufindi.

In the Spanish study areas, trace elements such as: arsenic (As), cadmium (Cd), chromium (Cr), copper (Cu), mercury (Hg), nickel (Ni), lead (Pb), and zinc (Zn) were characterized in both soil and vegetation using spectral signatures obtained in controlled environments and analytical results from laboratory testing. Based on this characterization, distinctive spectral bands were selected to locate potential areas impacted by heavy metals using techniques such as Crosta analysis and normalized difference spectral indices.

The study demonstrated high accuracies (>80%) using the Crosta technique with Sentinel-2 imagery for detecting As, Cr, and Ni in soil, as well as As in vegetation in the Southeast Regional Park. In contrast, in the Guadalquivir River Valley, the detection of Hg and Zn in soil and As, Cr, Cu, and Zn in vegetation stood out, while the lowest accuracy was observed in detecting Cd. On the other hand, the use of

PRISMA imagery facilitated spectral selection; however, it showed lower accuracies compared to Sentinel-2, ranging between 45% and 55%, primarily due to the limited number of samples available for validation. Normalized difference indices in Sentinel-2 were more user-friendly than the Crosta technique, yielding good results for Cr and Cu (>80%) in vegetation.

Regarding the results of technology transfer from Spain to Ecuador, acceptable accuracies were achieved in the detection of trace elements, with significant improvements in some cases, such as Cd and Ni in soil (>60%) and Cr, Ni, and Zn in vegetation. Spectral indices demonstrated good accuracy for As, Cd, Cr, and Ni in soil, as well as Hg, Ni, and Pb in vegetation, although elements such as Cu, Hg, Pb, and Zn showed lower performance.

Direct beneficiaries of this research include farmers, agroforestry producers, institutions such as the Ministry of Agriculture and Livestock (MAG), local authorities, and researchers. Indirectly, the work benefits consumers, importing countries, the environment, public policy, and society, promoting more effective regulations for sustainable land management.

Keywords: Remote sensing, heavy metals, image spectrometry, environmental contamination, spectral characterization, geospatial technologies, geomatics.

Resumen

La Unión Europea, en los últimos 5 años, ha registrado valores anuales sobre los 6 millones de dólares en importación de productos alimenticios, de los que sobresalen el banano, el camarón y derivados de cacao. Alemania, Bélgica, España, Francia, Holanda e Italia, constituyen uno de los principales mercados de exportación para Ecuador de los mencionados productos. Mantener y potenciar esta línea económica y el cumplimiento de las normativas que Europa impone a las condiciones de producción y a la calidad de los productos agrícolas, genera la necesidad de monitorear el estado de salud de las explotaciones agrícolas en origen, previo a su comercialización.

La presente tesis doctoral propone un método de análisis para la detección de elementos traza en tierras agro-forestales, el cual implica la integración de tecnologías geoespaciales y datos multifuente. A partir de estas tecnologías se caracterizan espectralmente los metales pesados, contando con longitudes de onda útiles para el estudio del problema, las cuales permiten proponer y ajustar índices de vegetación, y/o analizar diferencialmente componentes principales, con la finalidad de localizarlos especialmente.

Una vez realizado el estudio teórico del problema, se efectuaron investigaciones experimentales en el Parque Regional del Sureste y en el valle del río Guadalquivir en España. Además, se llevó a cabo una transferencia de tecnología, a partir de las habilidades, conocimientos y herramientas adquiridas en territorio español, a suelo ecuatoriano, específicamente a la zona de estudio ubicada entre los poblados de Francisco de Orellana y Shushufindi.

A partir de las zonas de estudio en España, se pudieron caracterizar los elementos traza: arsénico (As), cadmio (Cd), cromo (Cr), cobre (Cu), mercurio (Hg), níquel (Ni), plomo (Pb) y zinc (Zn), tanto en suelo como en vegetación, empleando como insumo principal las firmas espectrales obtenidas en gabinete como las analíticas realizadas en laboratorio.

A partir de la caracterización mencionada se seleccionaron bandas espectrales características las cuales fueron utilizadas en el proceso de localización de posibles zonas afectadas por metales pesados, empleando técnicas como la de Crósta e índices espectrales de diferencia normalizada.

El estudio evidenció buenas precisiones (> 80%), empleando la técnica Crósta con imágenes Sentinel-2, para detectar As, Cr y Ni en suelo, y As en vegetación en el Parque Regional del Sureste, mientras que en el valle del río Guadalquivir destacó la detección de Hg y Zn en suelo, y As, Cr, Cu y Zn en vegetación, mientras que, la menor precisión obtenida fue al momento de detectar Cd. Por otro lado, el uso de imágenes PRISMA facilitaron la selección espectral, sin embargo, presentaron precisiones menores en comparación a Sentinel-2, las cuales fluctúan entre 45 y 55%, debiéndose a la escasa cantidad de muestras para validación. Los índices de diferencia normalizada en Sentinel-2 fueron más amigables que la técnica Crósta, con buenos resultados para Cr y Cu (> 80%) en vegetación.

En cuanto a los resultados de la transferencia de tecnología de España a Ecuador, se obtuvieron precisiones aceptables en la detección de elementos traza, con mejoras significativas en algunos casos, como Cd y Ni en suelo (> 60%) y Cr, Ni y Zn en vegetación. Los índices espectrales evidenciaron una buena precisión para As, Cd, Cr y Ni en suelo, y para Hg, Ni y Pb en vegetación, aunque elementos como Cu, Hg, Pb y Zn presentaron rendimientos más bajos.

Los beneficiarios directos de la investigación incluyen agricultores, productores agroforestales, instituciones como el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), autoridades locales e investigadores. Indirectamente, impacta a consumidores, países importadores, medio ambiente, políticas públicas y sociedad, promoviendo normativas más efectivas para la gestión territorial sostenible.

Palabras Clave: Teledetección, metales pesados, espectrometría de imagen, contaminación ambiental, caracterización espectral, tecnologías geoespaciales, geomática

Tabla de Contenido

Dedicatoria *ii*
Agradecimientos *iii*
Abstract *vi*
Resumen *viii*
Lista de Figuras *xiii*
Lista de Tablas *xviii*
Abreviaturas y Acrónimos *xxi*

1. INTRODUCCIÓN 1

1.1. Planteamiento del problema ... 2
1.2. Preguntas de investigación ... 4
1.3. Objetivos ... 4
1.3.1. General ... 5
1.3.2. Específicos ... 5
1.4. Hipótesis de la investigación ... 5
1.5. Estructura de la investigación ... 6
1.6. Actividades doctorales ... 7

2. ESTADO DEL ARTE SOBRE METALES PESADOS 11

2.1. Descripción ... 12
2.2. Afectación a la salud humana ... 15
2.3. Incidencia en suelos y en vegetación ... 16
2.4. Normativa ... 21
2.5. Mitigación y reducción de efectos negativos ... 25
2.6. Proyectos de cooperación y colaboración interinstitucional ... 27

3. ESPECTROMETRÍA DE IMAGEN 29

3.1. Introducción a la espectrometría de imagen ... 30
3.2. Firmas espectrales ... 32
3.2.1. Reflectividad de superficies ... 33
3.2.2. Librerías espectrales ... 36
3.2.3. Transformaciones ... 36
3.3. Técnicas para localización y mapeo de elementos traza ... 39
3.3.1. Análisis de Componentes Principales (ACP) ... 40

3.3.2. NDSI 42
3.3.3. Clasificaciones digitales 42
3.3.4. Regresiones 44
4. EXPERIMENTACIÓN 46
4.1. Introducción y flujograma de experimentación 47
4.2. Áreas test 50
4.2.1. Ubicación geográfica 50
4.2.2. Descripción físico ambiental 52
4.3. Adquisición y procesamiento de geoinformación 53
4.3.1. Datos geoespaciales 54
4.3.2. Datos espectrales 56
4.4. Aproximación inicial para detección de metales pesados 56
4.4.1. Caracterización espectral 56
4.4.2. Transformación de imagen mediante técnica de Crósta 65
4.4.3. Clasificación no supervisada 69
4.4.4. Localización geoespacial de minerales 70
4.5. Diseño, preparación y análisis muestral para detección de elementos traza 85
4.5.1. Flujo de actividades involucradas en las campañas de campo 86
4.5.2. Diseño del muestreo y toma de muestras 88
4.5.3. Preparación y análisis de muestras 98
4.5.4. Resultados de estaciones muestrales 107
4.6. Implementación de técnicas espectrométricas 110
4.6.1. Caracterización espectral y selección de bandas diagnóstico 110
4.6.2. Localización geoespacial de elementos traza mediante transformaciones de imágenes 152
5. VALIDACIÓN DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN 160
5.1. Diseño muestral verdad – terreno 161
5.2. Métricas estadísticas 162
5.3. Discusión 165
5.3.1. As 165
5.3.2. Cd 166
5.3.3. Cr 167
5.3.4. Cu 168
5.3.5. Hg 169
5.3.6. Ni 169
5.3.7. Pb 170
5.3.8. Zn 171
6. TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA A ECUADOR 173
6.1. Zona de estudio 174
6.1.1. Ubicación geográfica 175

6.1.2. Descripción físico ambiental ... 176
6.2. Obtención y tratamiento de geoinformación ... 177
6.3. Estaciones muestrales ... 178
6.3.1. Mapeo preliminar espectrométrico ... 178
6.3.2. Campaña de campo y resultados ... 181
6.4. Empleo de técnicas espectrométricas para detección de metales pesados ... 184
6.4.1. Técnica de Crósta ... 184
6.4.2. NDSI ... 185
6.5. Validación de resultados ... 186
6.6. Discusión de resultados obtenidos en la transferencia ... 187
7. CONCLUSIONES 191
7.1. Conclusiones ... 192
7.2. Innovación de la tesis ... 202
7.3. Utilidad de la investigación ... 203
7.4. Líneas futuras de investigación ... 204
7.5. Autoevaluación ... 205
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 206
ANEXOS 221

Lista de Figuras

Figura 2.1: Actividades donde se usan metales tóxicos. 12
Figura 2.2: Principales vías de exposición de contaminación del suelo. 17
Figura 2.3: Contenido (µg/g) de elementos traza en función de la roca. 20
Figura 3.1: Firma espectral del cacao de dos localidades. 32
Figura 3.2: Reflectancia de una hoja sana. 34
Figura 3.3: Características de absorción comunes en firmas espectrales de minerales. 35
Figura 3.4: Firmas de: a) curvas gaussianas de diversas intensidades; b) primera derivada; c) segunda derivada. 37
Figura 3.5: Firmas con: a) tendencias no lineales; b) tendencias eliminadas. 38
Figura 3.6: Firmas con: a) ruido; b) suavizado Savitzky-Golay. 39
Figura 3.7: Aplicación de ACP en un conjunto de datos. 40
Figura 3.8: Algoritmos de aprendizaje. 43
Figura 3.9: Ilustración del clasificador SAM en dos bandas espectrales. 44
Figura 4.1: Flujograma de experimentación. 49
Figura 4.2: Ubicación del PRS. 51
Figura 4.3: Ubicación del RG. 52
Figura 4.4: Características espectrales de Sentinel-2. 57
Figura 4.5: Respuesta espectral y transmisión debido a la absorción de vapor de agua para el caso de Sentinel-2. 57
Figura 4.6: Firmas espectrales de minerales característicos del PRS. 59
Figura 4.7: Firmas espectrales de minerales con presencia de metales pesados: a) As; b) Cd; c) Cr; d) Cu; e) Hg; f) Ni; g) Pb; h) Zn. 63
Figura 4.8: Creación de librería espectral personalizada. 65
Figura 4.9: Secuencia de procesos de la clasificación no supervisada: a) clasificador no supervisado *k-means*; b) producto fusionado. 70
Figura 4.10: *Scatter plot*: a) bandas 11 vs 12; b) bandas 7 vs 9. 71

Figura 4.11: Combinación Crósta: B, B+S, S. 72
Figura 4.12: Detección de montmorillonita: a) río Manzanares; b) San Martín de la Vega... 74
Figura 4.13: Detección de sepiolita: Vicálvaro. 75
Figura 4.14: Detección de calcita: Colmenar de Oreja. 76
Figura 4.15: Detección de yeso: Colmenar de Oreja. 77
Figura 4.16: Detección inicial de As: a) PRS (canteras de Morata); b) RG (Sanlúcar). 78
Figura 4.17: Detección inicial de Cd: a) PRS (Getafe); b) RG (La Puebla del Río). 79
Figura 4.18: Detección inicial de Cr: a) PRS (Pinto); b) RG (Sanlúcar la Mayor). 80
Figura 4.19: Detección inicial de Cu: a) PRS (San Martín de la Vega); b) RG (Aznalcóllar)..... 81
Figura 4.20: Detección inicial de Hg: a) PRS (Morata de Tajuña); b) RG (Aznalcóllar)..... 82
Figura 4.21: Detección inicial de Ni: a) PRS (Vallequillas Norte); b) RG (La Puebla del Rio)... 83
Figura 4.22: Detección inicial de Pb: a) PRS (Morata de Tajuña); b) RG (Carrión de los Céspedes).84
Figura 4.23: Detección inicial de Zn: a) PRS (Villaconejos); b) RG (Aznalcóllar). 85
Figura 4.24: Flujo de actividades en campaña de campo. 87
Figura 4.25: Planificación de estaciones muestrales y recorrido en: a) PRS; b) RG. 90
Figura 4.26: Posicionamiento: a) uso GNSS; b) equipo Trimble R4 empleado; c) método RTK protocolo NTRIP. 91
Figura 4.27: Distribución de incrementos para captura de muestra compuesta de suelo. ... 92
Figura 4.28: Almacenamiento de muestras compuestas de suelo en bolsas de plástico. 93
Figura 4.29: Toma de muestras de: a) suelo; b) hojas de cultivo. 95
Figura 4.30: Captura de medidas expeditas. 96
Figura 4.31: Estadillo de campo. 98
Figura 4.32: Representación geoespacial de empresas y universidades de España que cuentan con equipos de laboratorio. 99
Figura 4.33: Preparación física: a) selección de 125 g para tamizado; b) molido de muestras.0
Figura 4.34: Preparación física para análisis: a) medida pH; b) medida CE. 101
Figura 4.35: Digestión y análisis de muestras de suelo: a) digestión en autoclave; b) resultado de digestión filtrado y aforado; c) ICP-OES equipo iCAP-PRO; d) espectrofotómetro AMA254. 102
Figura 4.36: Preparación física de cultivos: a) lavado y secado de hojas; b) micromolino Becken para pulverizar las hojas. 103

Figura 4.37: Autoclaves y muestras de cultivo previo a la digestión. 104
Figura 4.38: Captura de firmas: a) recipientes color negro; b) montaje de los equipos..... 105
Figura 4.39: Firmas espectrales del blanco: a) optimización; b) *white reference*..... 106
Figura 4.40: Manejo de espectrorradiómetro ASD FieldSpec3 en campaña de campo. 107
Figura 4.41: Medición de patrones en Qtegra. 108
Figura 4.42: AMA254: a) ingreso de muestra molida; b) resultados obtenidos..... 108
Figura 4.43: Certificado de calibración de equipo ASD FieldSpec4. 109
Figura 4.44: Firmas espectrales de estaciones seleccionadas: a) suelo; b) vegetación..... 112
Figura 4.45: Transformaciones: a) 1ª derivada; b) eliminación de tendencia..... 112
Figura 4.46: Transformaciones aplicadas a los espectros puros. 113
Figura 4.47: Firmas espectrales (campo y laboratorio) de la estación muestral SEV-S-62. . 114
Figura 4.48: Firmas espectrales de suelo y vegetación para caracterización de As y sus correspondientes fotografías en campo: a) suelo; b) vegetación (arroz)..... 115
Figura 4.49: Firmas espectrales de suelo con diferente contenido de As. 116
Figura 4.50: Contraste de la 1ª derivada de la firma espectral de suelo triturado (SEV-S-032) con la 1ª derivada de la Escorodita. 117
Figura 4.51: Correlación de firmas vs analíticas suelo (superior) y vegetación (inferior).... 119
Figura 4.52: Firmas espectrales de suelo y vegetación para caracterización de Cd y sus correspondientes fotografías en campo: a) suelo; b) vegetación (almendro). 121
Figura 4.53: Firmas espectrales de suelo con diferente contenido de Cd..... 122
Figura 4.54: Firmas espectrales de suelo y vegetación para caracterización de Cr y sus correspondientes fotografías en campo: a) suelo; b) vegetación (cereal). 125
Figura 4.55: Firmas espectrales de suelo con diferente contenido de Cr. 126
Figura 4.56: Contraste de la 1ª derivada de las firmas espectrales de suelo (superior) y vegetación (inferior) versus la respectiva transformada del elemento Magnesiocromita. 127
Figura 4.57: Firmas espectrales de suelo y vegetación para caracterización de Cu (superior) y su correspondiente fotografía en campo (inferior)..... 129
Figura 4.58: Firmas espectrales de suelo con diferente contenido de Cu..... 130
Figura 4.59: Contraste de la 1ª derivada de la firma espectral de suelo triturado (SEV-S-054) con la 1ª derivada de la Azurita. 130

Figura 4.60: Firmas espectrales de suelo y vegetación para caracterización de Hg y sus correspondientes fotografías en campo: a) suelo; b) vegetación (olivar). 133
Figura 4.61: Firmas espectrales de suelo con diferente contenido de Hg. 134
Figura 4.62: Contraste de la transformación *detrend* de la firma espectral de suelo triturado (SEV-S-032) con su similar del Cinabrio. 134
Figura 4.63: Firmas espectrales de suelo y vegetación para caracterización de Ni y sus correspondientes fotografías en campo: a) suelo; b) vegetación (herbácea nativa). 137
Figura 4.64: Firmas espectrales de suelo con diferente contenido de Ni. 138
Figura 4.65: Contraste de la 1ª derivada de la firma espectral de suelo triturado (SEV-S-032) con la 1ª derivada de la Escorodita. 138
Figura 4.66: Firmas espectrales de suelo y vegetación para caracterización de Pb y sus correspondientes fotografías en campo: a) suelo; b) vegetación (girasol). 141
Figura 4.67: Firmas espectrales de suelo con diferente contenido de Pb. 142
Figura 4.68: Contraste de la 1ª derivada de la firma espectral de la hoja de cultivo de girasol (SEV-C-047) con la 1ª derivada de la Cerusita. 142
Figura 4.69: Firmas espectrales de suelo y vegetación para caracterización de Zn y sus correspondientes fotografías en campo: a) suelo; b) vegetación (tomate). 145
Figura 4.70: Firmas espectrales de suelo con diferente contenido de Zn. 146
Figura 4.71: Contraste de la 1ª derivada de la firma espectral de suelo triturado (SEV-S-031) con la 1ª derivada de la Hemimorfita. 146
Figura 4.72: Correlaciones entre las firmas espectrales de suelo (superior) y vegetación (inferior) versus las analíticas. 149
Figura 4.73: Resumen de bandas espectrales seleccionadas. 152
Figura 5.1: Ejemplo de obtención de regiones de validación en PRS. 161
Figura 6.1: Lista de países exportadores 2019. Producto 1801: Cacao en grano, entero o partido, crudo o tostado. 174
Figura 6.2: Ciclo del cultivo del cacao. 175
Figura 6.3: Ubicación del PRS. 176
Figura 6.4: Planificación de estaciones muestrales en EC. 182
Figura 6.5: Levantamiento de muestras en EC. 183
Figura 6.6: Preparación física de muestras EC: a) secado de muestras; b) determinación de materia orgánica. 183

Figura 6.7: Firmas espectrales: a) muestras EC; b) captura..... 184
Figura 7.1: Sistema de monitoreo de metales pesados. 194
Figura 7.2: Análisis FODA personal. 205

Lista de Tablas

Tabla 2.1: Características y usos de los elementos traza. 13

Tabla 2.2: Afecciones a la salud humada originada por el consumo elevado de metales. 16

Tabla 2.3: Consecuencia del exceso de metales pesados en suelo y vegetación. 18

Tabla 2.4: Límites permisibles de metales pesados en agua potable (mg/l). 23

Tabla 2.5: Límites permisibles de metales pesados en aire (µg/m^3). 23

Tabla 2.6: Límites permisibles de metales pesados en suelo (mg/kg). 24

Tabla 2.7: Límites permisibles de metales pesados en alimentos (mg/kg). 24

Tabla 2.8: Límites permisibles de metales pesados en seres humanos. 25

Tabla 3.1: Características de absorción en la reflectancia espectral. 30

Tabla 3.2: Resumen de sensores empleados en teledetección. 31

Tabla 4.1: Cartografía base y temática. 54

Tabla 4.2: Imágenes satelitales. 55

Tabla 4.3: Bibliotecas espectrales. 56

Tabla 4.4: Bandas absortivas y reflectivas de minerales con mayor presencia en el PRS. 58

Tabla 4.5: Bandas análogas Sentinel-2. 60

Tabla 4.6: Minerales con importancia geológica-económica y con presencia de metales. ... 61

Tabla 4.7: Bandas análogas absortivas y reflectivas con bandas de Sentinel-2. 63

Tabla 4.8: Matriz de autovectores del ACP, caso: Montmorillonita (2021), zona del PRS. 66

Tabla 4.9: Matriz de autovectores del ACP, caso: Montmorillonita, histograma mejorado. . 67

Tabla 4.10: Matriz de autovectores del ACP de los minerales en estudio, zonas PRS y RG. .. 67

Tabla 4.11: Número de muestras planificadas vs ejecutadas en áreas test. 89

Tabla 4.12: Resumen de concentraciones máximas permisibles bajo diferentes enfoques. 110

Tabla 4.13: Caracterización de As a partir de las firmas espectrales base. 116

Tabla 4.14: Selección de bandas espectrales sensibles al contenido de As a partir de las transformaciones de las firmas espectrales. 118

Tabla 4.15: Selección de longitudes de onda sensibles al contenido de As empleando la correlación entre firmas espectrales y analíticas. 119
Tabla 4.16: Caracterización de Cd a partir de las firmas espectrales base. 122
Tabla 4.17: Selección de bandas espectrales sensibles al contenido de Cd a partir de las transformaciones de las firmas espectrales. 123
Tabla 4.18: Selección de longitudes de onda sensibles al contenido de Cd empleando la correlación entre firmas espectrales y analíticas. 123
Tabla 4.19: Caracterización de Cr a partir de las firmas espectrales base. 127
Tabla 4.20: Selección de bandas espectrales sensibles al contenido de Cr a partir de las transformaciones de las firmas espectrales. 127
Tabla 4.21: Selección de longitudes de onda sensibles al contenido de Cr empleando la correlación entre firmas espectrales y analíticas. 128
Tabla 4.22: Caracterización de Cu a partir de las firmas espectrales base. 131
Tabla 4.23: Selección de bandas espectrales sensibles al contenido de Cu a partir de las transformaciones de las firmas espectrales. 131
Tabla 4.24: Selección de longitudes de onda sensibles al contenido de Cu empleando la correlación entre firmas espectrales y analíticas. 132
Tabla 4.25: Caracterización de Hg a partir de las firmas espectrales base. 135
Tabla 4.26: Selección de bandas espectrales sensibles al contenido de Hg a partir de las transformaciones de las firmas espectrales. 135
Tabla 4.27: Selección de longitudes de onda sensibles al contenido de Hg empleando la correlación entre firmas espectrales y analíticas. 136
Tabla 4.28: Caracterización de Ni a partir de las firmas espectrales base. 139
Tabla 4.29: Selección de bandas espectrales sensibles al contenido de Ni a partir de las transformaciones de las firmas espectrales. 139
Tabla 4.30: Selección de longitudes de onda sensibles al contenido de Ni empleando la correlación entre firmas espectrales y analíticas. 140
Tabla 4.31: Caracterización de Pb a partir de las firmas espectrales base. 143
Tabla 4.32: Selección de bandas espectrales sensibles al contenido de Pb a partir de las transformaciones de las firmas espectrales. 143
Tabla 4.33: Selección de longitudes de onda sensibles al contenido de Pb empleando la correlación entre firmas espectrales y analíticas. 144
Tabla 4.34: Caracterización de Zn a partir de las firmas espectrales base. 147

Tabla 4.35: Selección de bandas espectrales sensibles al contenido de Zn a partir de las transformaciones de las firmas espectrales. 147
Tabla 4.36: Selección de longitudes de onda sensibles al contenido de Zn empleando la correlación entre firmas espectrales y analíticas. 148
Tabla 4.37: Selección de bandas espectrales mediante el uso de múltiples clasificadores dentro del *software* Weka. 150
Tabla 4.38: Longitudes de onda sensibles al contenido de elementos traza en suelo y vegetación, análogas con las bandas espectrales de Sentinel-2. 153
Tabla 4.39: Selección de bandas espectrales por cada metal pesado y comparativa con bandas seleccionadas en la aproximación inicial. 155
Tabla 4.40: Comparación de fechas de imágenes empleadas y campaña de campo. 156
Tabla 4.41: CP seleccionadas a partir de Crósta y bandas Sentinel-2 de mayor contraste.. 156
Tabla 4.42: Longitudes de onda sensibles al contenido de elementos traza en suelo y vegetación, análogas con las bandas espectrales de PRISMA. 157
Tabla 4.43: CP seleccionadas a partir de Crósta y bandas PRISMA de mayor contraste. 159
Tabla 4.44: Combinaciones de bandas Sentinel-2 empleadas en índices espectrales. 159
Tabla 5.1: Número de muestras de validación por localidad y por objetivo. 162
Tabla 5.2: Validación de la técnica Crósta con imagen Sentinel-2. 163
Tabla 5.3: Validación de la técnica Crósta con imagen PRISMA. 163
Tabla 5.4: Validación de los NDSI en RG. 164
Tabla 6.1: Cartografía base y temática EC. 177
Tabla 6.2: Imágenes satelitales EC. 177
Tabla 6.3: CP seleccionadas a partir de la técnica de Crósta en EC. 179
Tabla 6.4: Número de muestras planificadas vs ejecutadas EC. 182
Tabla 6.5: CP seleccionadas a partir de Crósta en EC y bandas de alto contrate. 185
Tabla 6.6: Combinaciones de bandas Sentinel-2 empleadas en índices espectrales en EC. 185
Tabla 6.7: Validación de la técnica Crósta en EC. 186
Tabla 6.8: Validación de los NDSI en EC. 187

Abreviaturas y Acrónimos

ACP	Análisis de Componentes Principales
ANECACAO	Asociación Nacional de Exportadores de Cacao e Industrializados del Ecuador
ANN	*Artificial Neural Network*
As	Arsénico
ASD	*Analytical Spectral Devices*
ASI	*Agenzia Spaziale Italiana*
ASTER	*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*
ATCOR	*Atmospheric and topographic correction*
AVIRIS	*Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer*
BOA	*Bottom Of Atmosphere*
BTN	Base Topográfica Nacional
CCME	*Canadian Council of Ministers of the Environment*
Cd	Cadmio
CE	Conductividad Eléctrica
CEBAS	Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura
CEPAL	Comisión Económica para América Latina y el Caribe
CGSIN	Coordinación General del Sistema de Información Nacional
CIEMAT	Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas
CM	Comunidad de Madrid
CORPEI	Corporación de Promoción de Exportaciones e Inversiones
CP	Componente(s) Principal(es)
Cr	Cromo
CSIC	Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Cu	Cobre

EENNPP	Espacios Naturales Protegidos de Andalucía
EFSA	*European Food Safety Authority*
EPA	*Environmental Protection Agency of United States*
ERGNSS	Red Geodésica Nacional de Estaciones de Referencia GNSS
ESA	*European Space Agency*
ESPE	Universidad de las Fuerzas Armadas
ESPOL	Escuela Politécnica del Litoral
EVA	Entorno Virtual de Aprendizaje
FAO	*Food and Agriculture Organization of the United Nations*
FITOUAM	Grupo de Investigación de Fitorremediación
FPCS	*Feature Oriented Principal Components Selection*
GCP	*Ground Control Points*
GEF	*Global Environment Facility*
GEOINCA	Grupo de Investigación en Geomática e Ingeniería Cartográfica
GIZ	*Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit*
GNSS	*Global Navigation Satellite System*
Hg	Mercurio
HIRIS	*High Resolution Imaging Spectrometer*
ICP-OES	Espectroscopía de Emisión Atómica con Plasma de Acoplamiento Inductivo
IFAPA	Instituto Andaluz de Investigación y Formación Agraria, Pesquera, Alimentaria y de la Producción Ecológica
IGM	Instituto Geográfico Militar, Ecuador
IGME	Instituto Geológico y Minero de España
IGN	Instituto Geográfico Nacional, España
IHOBE	Sociedad Pública de Gestión Ambiental del Gobierno Vasco
IIGE	Instituto de Investigación Geológico y Energético
IISD	*International Institute for Sustainable Development*

INIAP	Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias
IPCS	*International Programme on Chemical Safety*
IRS	*Indian Remote Sensing Satellite*
ISO	*Internacional Organization for Standardization*
ITC	*International Trade Centre*
JAXA	*Japanese Aerospace Exploration Agency*
JECFA	Comité Mixto FAO/OMS de Expertos en Aditivos Alimentarios
JPL	*Jet Propulsion Laboratory*
LiDAR	*Laser Imaging Detection and Ranging*
LWL	*Locally Weighted Learning*
MAATE	Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica
MAG	Ministerio de Agricultura y Ganadería, Ecuador
MAPAMA	Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, España
MDT	Modelo Digital del Terreno
MITMA	Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana
MODTRAN	*Moderate Spectral Resolution Transmittance*
NASA	*National Aeronautics and Space Administration*
ND	Números digitales
NDSI	*Normalized Difference Spectral Index*
NDVI	*Normalized Difference Vegetation Index*
Ni	Níquel
NTRIP	*Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*
OA	Overall Accuracy
OMS	Organización Mundial de la Salud
ONU	Organización de las Naciones Unidas
OSAVI	*Optimized Soil-Adjusted Vegetation Index*
PAGE	*Partnership for Action on Green Economy*
Pb	Plomo

PLSR	*Partial Least Squares Regression*
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
PRISMA	*PRecursore IperSpettrale della Missione Applicativa*
PRS	Parque Regional del Sureste de Madrid, España
REDIAM	Red de Información Ambiental de Andalucía
REGME	Red GNSS de Monitoreo Continuo del Ecuador
RG	Valle del río Guadalquivir, Andalucía, España
RMSE	*Root Mean Square Error*
ROI	*Region Of Interest*
RTK	*Real Time Kinematic*
SAM	*Spectral Angle Mapper*
SENESCYT	Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación
SIOSE	Sistema de Información sobre Ocupación del Suelo de España
SPOT	*Satellite Pour l'Observation de la Terre*
TOA	*Top Of Atmosphere*
UAM	Universidad Autónoma de Madrid
UPM	Universidad Politécnica de Madrid
USDA	*United States Department of Agriculture*
USGS	*United States Geological Survey*
UTEQ	Universidad Técnicas Estatal de Quevedo
Zn	Zinc

1. INTRODUCCIÓN

"La utilidad de los libros es que inspiran y ayudan al hombre para entender y descifrar su propio corazón"

(Vicente Ferrer)

CONTENIDO:

1.1.	Planteamiento del problema	2
1.2.	Preguntas de investigación	4
1.3.	Objetivos	4
1.4.	Hipótesis de la investigación	5
1.5.	Estructura de la investigación	6
1.6.	Actividades doctorales	7

1.1. Planteamiento del problema

La degradación de un ecosistema está sujeta a la presencia de metales pesados (As, Cd, Hg, Pb, etc.), los cuales pueden tener origen geogénico o antropogénico, siendo estos últimos considerados por Galán & Romero (2008) como los "verdaderos contaminantes", producidos principalmente por residuos peligrosos derivados de actividades industriales, agrícolas, mineras, etc., y por residuos sólidos urbanos.

La falta de control de emisiones de estos residuos puede traer consigo consecuencias negativas para la salud humana, debido a la bioacumulación de elementos traza, originado por su incremento dentro del sistema alimenticio o por el consumo en bajas cantidades por un largo período de tiempo, trayendo como consecuencia enfermedades crónicas, incapacidad o la muerte (Siegel, 2002), por ejemplo, el consumo elevado de cadmio, en una zona contaminada por este metal, trae consigo efectos perjudiciales en la esperanza de vida (Nakagawa et al., 1990), específicamente se relaciona con disfunciones renales, osteopenia (Kido et al., 1990), cáncer de pulmón (Sorahan & Lancashire, 1997), y cáncer de próstata (Waalkes & Rehm, 1994).

Los primeros hallazgos se dan aproximadamente entre los años 1950 y 1960, siendo la ciudad de Minamata y la prefectura de Toyama, Japón, afectadas por metilmercurio y cadmio, respectivamente. Entre los años 1980 y 1990, el plomo es considerado como una enfermedad social, por otro lado, la contaminación por arsénico alarmó a las poblaciones de West Bengal, ubicado en la India, y, a Bangladesh (Adriano, 2001).

De manera símil, la presencia de elementos traza en la vegetación genera estrés, trayendo como consecuencia cambios metabólicos y morfológicos, por ejemplo, permutaciones en la tasa de fotosíntesis (respiración y transpiración), en la concentración absoluta o relativa de pigmentos (clorofila y carotenoides), y en la estructura de las hojas (Arellano et al., 2015; Davids & Tyler, 2003). Benavides et al. (2005) mencionan que, elementos como el cadmio, afecta a los cultivos en el consumo de minerales, en la apertura estomática, la fotosíntesis, siendo sus síntomas fácilmente detectados a través de un retraso del crecimiento o por clorosis.

La normativa de la Unión Europea determina niveles máximos de metales pesados en productos alimenticios, previo a su ingreso y comercialización en territorio europeo, con la finalidad de proteger la salud pública, por ejemplo, a partir del 12 de mayo de 2014, entró en vigor el Reglamento (UE) no 488/2014, en donde se

establecen los contenidos máximos de cadmio en una amplia gama de alimentos (Comisión Europea, 2014).

Las exportaciones de productos como banano, camarón y cacao, para el año 2019, sitúan a Ecuador en los puestos 1ero., 2do. y 5to. a nivel mundial, respectivamente, en donde el banano representa el 23,2% de las exportaciones mundiales, y el cacao el 7,1%; cabe destacar que, uno de los destinos que tienen los mencionados productos, es la Unión Europea, en donde países como: Alemania, Bélgica, España, Francia, Holanda e Italia, representan aproximadamente el 35% del mercado de exportación del cacao (consumo per cápita > 4 kg/año/habitante), el 20% de camarón (consumo per cápita ~ 2 kg/año/habitante), y el 15% de banano (consumo per cápita ~ 13 kg/año/habitante) (ITC, 2020; Syndicat du Chocolat, 2019). Por ende, es importante el monitoreo constante de mencionados productos, con la finalidad de evitar circunstancias adversas.

Se han realizado varios estudios de campo y laboratorio, en diferentes localidades de Ecuador, con la finalidad de determinar la presencia de metales pesados, por ejemplo: Félix et al. (2002) determinaron elevadas cantidades de cadmio en las provincias de El Oro y Los Ríos, sobre cultivos de banano, cacao, café, palma africana y plátano, y valores dentro de niveles permisibles de plomo y zinc; Rodríguez & Alvarado (2015) determinaron que los sedimentos del estero Huaylá poseen concentraciones de zinc, cadmio, plomo y cobre, por encima de los límites permisibles; Carrera-Quispe (1994) determinó que en los cantones Santa Rosa, Tenguel, Chone y Naranjal, las plantaciones de cacao presentan valores por > 1 mg/kg de cadmio; entre otros.

Hoy en día, una alternativa a los métodos tradicionales de muestreo de campo para detectar el estrés de la vegetación, es a través de la espectrometría, mediante el uso de imágenes (satelitales o aerotransportadas) o espectrorradiómetros, la cual permite identificar longitudes de onda diagnóstico de los metales pesados, así como diferencias que presentan las reflectancias de las hojas de plantas afectadas por estos, relacionadas a su vez con las propiedades bioquímicas y biofísicas de la vegetación (Arellano et al., 2015; Rosso et al., 2005); Shin et al. (2020) consideran a la espectrometría como no destructiva, rentable, repetible y como un método efectivo a la hora de determinar concentraciones de metales pesados en suelos.

El campo de la espectrometría tiene un amplio beneficio para estudios de agricultura de precisión, permitiendo a los agricultores refinar la fertilización, evaluar el estado nutricional de los cultivos, controlar la irrigación y/o detectar

cambios fisiológicos en las especies vegetales por plagas o enfermedades, a partir de índices de vegetación, útiles para la determinación de parámetros agroforestales (actividad fotosintética, estrés hídrico, nivel de productividad, etc.) (Meza et al., 2020; Soca-Muñoz et al., 2020).

Varias técnicas espectrométricas son empleadas para la localización de elementos traza, por ejemplo, índices espectrales de diferencia normalizada (NDSI, por sus siglas en inglés) (Das et al., 2020; Yao et al., 2010), análisis de componentes principales mediante técnica Crósta (Rejas et al., 2014), regresión mediante mínimos cuadrados parciales (Liu et al., 2018), entre otras.

El Trabajo Fin de Grado realizado por Alcocer (2017), es una de las escasas investigaciones elaboradas en Ecuador sobre espectrometría, en la cual mediante análisis de respuestas espectrales determinó que las plantaciones de cacao sobre pasivos ambientales se encuentran afectadas por la presencia de metales pesados, mostrando una variabilidad en la firma espectral, en comparación a cultivos de la misma especie sin presencia de contaminación, sobre todo en regiones del infrarrojo cercano. Otro ejemplo, es el estudio realizado por Mora & Cañarte (2017), el cual se centra en la caracterización de la firma espectral de la plantación de quinua.

1.2. Preguntas de investigación

En función del planteamiento del problema, las preguntas de la presente investigación son:

1) ¿Es viable, a partir de datos multifuente, caracterizar espectralmente a los metales pesados en explotaciones agro-forestales?
2) ¿Las tecnologías procedentes de programas actuales, de libre acceso, por ejemplo, de Copernicus, integrados con tecnologías in situ y/o datos multifuente, permiten el diseño de un sistema de monitorización de presencia de metales pesados?

1.3. Objetivos

Para solventar las preguntas en cuestión, y en función de la experiencia teórica y práctica adquirida, se han planteado los siguientes objetivos:

1.3.1. General

1) Estudiar y caracterizar la contaminación de explotaciones agrícolas por metales pesados, a partir de espectrometría de imagen.
2) Diseñar y proponer un sistema de monitoreo de metales pesados en explotaciones agrícolas a partir de la integración de tecnologías geoespaciales y datos multifuente.

1.3.2. Específicos

1) Caracterizar espectralmente a los metales pesados, evaluando las longitudes de onda diagnóstico en el espectro electromagnético.
2) Proponer y ajustar operadores, a partir de datos calibrados y bandas diagnóstico, para mapeo de elementos traza.
3) Diseñar la experimentación tanto geoespacial como in situ, elaborando zonas en las que implementar la metodología.
4) Diseñar la adquisición de datos, procesarlos y calibrarlos según estándares admitidos en la comunidad científica.
5) Realizar la transferencia de tecnología en función de las habilidades, conocimientos y herramientas empleadas en las áreas test de España, a la zona de estudio en Ecuador.
6) Validar los resultados obtenidos en función de análisis de laboratorio de las explotaciones agrícolas, in situ o pre existentes.
7) Analizar la incidencia del uso de datos multifuente en la detección de metales pesados.

1.4. Hipótesis de la investigación

Las hipótesis planteadas son:

1) A partir de datos multifuente en explotaciones agro-forestales se puede caracterizar espectralmente a los metales pesados, por sus bandas o longitudes de onda diagnóstico.
2) La cobertura espacial de datos geoespaciales, procedentes de programas actuales, por ejemplo, Copernicus, integrados con tecnologías in situ,

permiten el diseño de un sistema de monitorización preciso de presencia de metales pesados en explotaciones agro-forestales.

1.5. Estructura de la investigación

La investigación llevada a cabo es de tipo aplicada (según su propósito), explicativa (nivel de profundización), cualitativa (tipo de datos empleados), no experimental (grado de manipulación de variables), hipotética-deductiva (inferencia) y transversal (tiempo en el que se realiza), y se encuentra estructurada en 7 capítulos, siendo el presente capítulo utilizado para definir el planteamiento del problema.

El **capítulo 2** abarca la documentación del estado de arte sobre metales pesados, a partir de una recopilación sistemática de información bibliográfica en artículos científicos y libros.

El **capítulo 3** trata sobre la caracterización espectral de los metales pesados, incorporando conceptos esenciales sobre la teledetección y espectrometría de imagen.

El **capítulo 4** se fundamenta en la experimentación, realizando inicialmente la selección de áreas test localizadas en España, para luego proceder con la adquisición y procesamiento del set de datos, para por último implementar técnicas y algoritmos orientados a la detección de metales pesados.

El **capítulo 5** se centra en la validación de resultados y discusión, en donde se contrasta los productos con métodos alternativos o muestras verdad-terreno (análisis de laboratorio in situ o pre existente) procedente de entidades oficiales.

El **capítulo 6** radica en la transferencia de tecnología a Ecuador, siguiendo el flujo metodológico propuesto, además, se evalúa la aplicabilidad de las técnicas en una región diferente.

El **capítulo 7** presenta las conclusiones y recomendaciones del presente trabajo, además, expone la innovación de la tesis, su utilidad y líneas futuras de investigación que se podrían derivar a partir de este estudio.

Por último, se encuentran las referencias bibliográficas siguiendo la normativa APA 7th y los anexos relativos a análisis químicos de laboratorio, firmas espectrales y los mapas derivados.

1.6. Actividades doctorales

El presente apartado menciona de manera general las diferentes actividades realizadas a lo largo de la investigación, además, se destacan a aquellas instituciones, universidades y/o centros de investigación que han apoyado en la ejecución de la misma:

- SENESCYT, entidad en donde obtuve una beca, dentro del marco de la convocatoria abierta 2017 - componente general, con una duración de financiamiento de aproximadamente 4 años. Dicha subvención se encuentra constreñida a la línea de investigación "Extracción de parámetros agro-forestales mediante LiDAR e imágenes de alta y media resolución", con enfoque en el área de Ingeniería, Industria y Construcción.
- IGM, institución que autorizó la comisión de servicios para efectuar estudios regulares de posgrado en la UPM, considerando a los estudios efectuados de interés institucional y para el Estado. Cabe mencionar que, actualmente me encuentro laborando en dicho instituto, dentro de la Dirección Geográfica con el cargo de Especialista Geomático.
- UPM, centro educativo que posee una amplia experiencia en temas geográficos y geomáticos, brindándome la oportunidad de aprender, cursar como alumno e integrar al grupo de investigación AGA como investigador colaborador.
- GEOINCA de la Universidad de León, grupo de investigación en donde se obtuvieron las firmas espectrales mediante el uso del espectrorradiómetro ASD FieldSpec.
- UAM, CIEMAT y ESPE, instituciones que abrieron sus puertas para colaborar en el presente estudio, específicamente en el proceso de determinación de elementos traza.
- IEEE-P4005, integración y participación dentro de las reuniones del grupo de trabajo, el cual fue creado para establecer normativas y estándares para la captura de firmas espectrales.
- MAG, instituto público con el cual se mantuvo diferentes reuniones, pudiendo llegar a definir las posibles zonas de estudio en Ecuador, afectadas por metales pesados.

Además, durante el desarrollo del presente estudio, he podido realizar las siguientes actividades extracurriculares:

- TEPRO Consultores Agrícolas S.L., empresa especialista en desarrollar proyectos orientados a: agricultura y desarrollo rural, agua y medio ambiente, edificación, entre otros, misma que me ha dado la posibilidad de realizar prácticas por un lapso de 6 meses, tiempo en el cual aproveché el bagaje de conocimientos de sus profesionales, y también, existió un mayor acercamiento a las necesidades reales del campo agrícola, lo que permitió que los productos generados sean usufructuados.
- AGRODATO S.L., empresa dedicada a ofertar soluciones viables y prácticas para el sector AGRO-TECH, la cual me dio la oportunidad de realizar prácticas por el lapso de un año, y, actualmente me encuentro colaborando dentro de la misma, puntualmente en el departamento de innovación.
- UTEQ, entidad en la que realicé mis estancias por 4 meses, tiempo en el cual se aprovechó sobremanera los conocimientos científico y técnicos del personal que lo conforma. Actualmente me encuentro participando como investigador externo, dentro de proyectos relacionados a cambios temporales de uso y cobertura en: Franja de diversidad y vida, Cuencas Sagradas y Galápagos.

A continuación, se presentan las publicaciones y ponencias realizadas antes y durante el período de estudios del doctorado:

Publicaciones:

Las publicaciones científicas previas del autor abordan el uso de la teledetección y de los sistemas de información geográfica, relacionadas con: uso y cobertura vegetal, servicios ecosistémicos, y principalmente con técnicas espectrométricas, siendo esta última ampliada en la presente tesis doctoral, conectando los avances teóricos con aplicaciones prácticas, lo que refuerza su aporte científico y su relevancia para la gestión sostenible agroambiental.

- Evaluation and mapping of the positive and negative social values for the urban river ecosystem. Revista: One Ecosystem (PENSOFT). DOI:10.3897/ oneeco.8.e101122. Año: 2023.
- Land use and land cover changes in the diversity and life zone for uncontacted Indigenous people: deforestation hotspots in the Yasuní

Biosphere Reserve, Ecuadorian Amazon. Revista: Forests (MDPI). DOI: 10.3390/f12111539. Año: 2022.

- Espectrometría de imagen para el estudio y caracterización de la contaminación por metales pesados. Evento: III Congreso en Ingeniería Geomática, Valencia – España. DOI: 10.4995/CiGeo2021. 2021.12726. Año: 2021.
- Viabilidad de imágenes Landsat (ETM+ y OLI) para la determinación de conflictos de uso de la tierra en el cantón Portoviejo, Ecuador. Evento: XVII Congreso Nacional de TIG, Málaga – España. ISBN: 13 978-84-940784-9-1. Año: 2016.
- Obtención de firmas espectrales de 6 diferentes superficies mediante la utilización del espectrorradiómetro Exotech 100 Axm + T. Revista: Teledetección 2012 (no indexada). Año: 2012.
- Propuesta de un plan de manejo integral de la subcuenca del río Casacay, ubicada en los cantones Pasaje y Chilla, provincia de El Oro, mediante la utilización de herramientas SIG. Revista: Geoespacial Nº6 (ESPE). ISSN:1390-3993. Año: 2010.

Ponencias:

- Empleo de tecnologías geoespaciales para la caracterización de metales pesados IGAC. Evento: X Semana Geomática Internacional. Fecha: 11/10/2024.
- Seguridad para el desarrollo: Minería ilegal y pistas clandestinas. Evento: AmeriGEO Week 2024. Fecha: 28/08/2024.
- Caracterización espectral de metales pesados mediante la evaluación de longitudes de onda diagnóstico. Evento: Ciclo de Conferencias Técnicas del Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE). Fecha: 22/06/2023
- Caracterización de elementos traza mediante espectrometría de imágenes satelitales. Evento: III Congreso Nacional de Geografía organizado por la FLACSO. Fecha: 01/06/2023
- Estudio multitemporal del cambio de uso de suelo en la Biorregión Ecuador-Perú “Cuencas Sagradas” y en las Islas Galápagos. Evento: I Jornada

Subgrupos de Investigación y Doctorandos organizado por AGA – UPM. Fecha: 17/02/2023

- Empleo de la teledetección para cuantificar los cambios del uso de suelo en las Islas Galápagos. Evento: Webinar organizado por el IPGH. Fecha: 21/07/2022.
- Espectrometría de imágenes para la detección de metales pesados. Simposio: Tesis en tres minutos organizado por la EID – UPM. Fecha: 17/06/2022
- Cambios de uso y cobertura del suelo en hotspots de la amazonía occidental: el caso de la reserva de la biosfera Yasuní. Evento: III Taller Intercomisiones Ecuador organizado por el IPGH. Fecha: 08/12/2021
- Empleo de tecnologías geoespaciales para la caracterización de minerales y metales pesados. Evento: Webinar organizado por Geoteledetección y Esterd. Fecha: 07/12/2021

Cabe mencionar que, para llegar a la línea de investigación planteada en el presente estudio, se analizaron múltiples problemas suscitados en el Ecuador y que pueden ser abordados mediante técnicas de teledetección. El resumen gráfico del análisis mencionado se lo encuentra en el Anexo A.

2. ESTADO DEL ARTE SOBRE METALES PESADOS

"La educación es el arma más poderosa
que puedes usar para cambiar el mundo"
(Nelson Mandela)

CONTENIDO:

2.1.	Descripción	12
2.2.	Afectación a la salud humana	15
2.3.	Incidencia en suelos y en vegetación	16
2.4.	Normativa	21
2.5.	Mitigación y reducción de efectos negativos	25
2.6.	Proyectos de cooperación y colaboración interinstitucional	27

2.1. Descripción

Los metales pesados se caracterizan por presentar una densidad mayor que 4 g/cm^3, una masa atómica superior a 20 u, y son considerados contaminantes prioritarios debido a su no degradabilidad y su larga persistencia en el ambiente. Su origen puede ser geogénico, procedentes de la meteorización de la roca madre o eventos geológicos, o antropogénico, a partir de residuos peligrosos derivados de actividades industriales, mineras, agrícolas, etc. (Figura 2.1); algunos elementos son transportados y distribuidos a los ecosistemas, e incorporados en la cadena trófica (Durães et al., 2017; Galán & Romero, 2008; Londoño-Franco et al., 2016).

	As	Be	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Hg	Mn	Mo	Ni	Pb	Sb	Se	Sn	Ti	Tl	V	Zn
Alloys	•		•	•	•	•			•		•	•	•	•		•			•
Batteries and Electro/Chemical Cells		•						•	•		•	•		•					•
Biocides (Agriculture, Anti-Fouling)	•							•	•						•				
Ceramics and Glass	•			•							•	•		•		•	•		
Chemicals, Pharmaceuticals, Dental	•		•		•	•		•		•		•	•	•	•			•	•
Coatings (anti-corrosives)			•		•					•		•			•				•
Electrical Equipment and Apparatus		•				•		•					•						
Fertilizers	•		•		•	•		•	•		•	•							•
Fossil Fuel Combustion (Electricity)	•		•					•				•	•	•					
Mining, Smelting, Metallurgy	•	•	•		•	•		•	•		•	•	•	•		•	•	•	•
Nuclear Reactor (Moderator, Absorber)		•	•																
Paints and Pigments	•		•	•	•	•			•		•	•	•	•		•			•
Petroleum Refining	•			•	•	•					•	•						•	•
Pipes, Sheets, Machinery						•	•					•							
Plastics			•									•							•
Pulp and Paper					•	•		•			•	•							
Rubber														•					•
Semi-conductors, Super-conductors	•												•		•		•		
Tanning and Textiles	•				•	•													
Wood Preservative Treatment	•				•				•										

Figura 2.1: Actividades donde se usan metales tóxicos.
Fuente: Siegel (2002).

Para el presente estudio se han seleccionado ocho metales pesados, los cuales son considerados como muy tóxicos, fácilmente disponibles y fácilmente movilizados por la actividad humana, los cuales son: As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb y Zn (Galán & Romero, 2008). Elementos como Cr, Cu, Ni y Zn son micronutrientes esenciales para diversas funciones bioquímicas y fisiológicas, sin embargo, el suministro inadecuado de dichos metales, da como resultado una variedad de enfermedades y/o síndromes, por otro lado, los metales As, Cd, Hg y Pb no tienen funciones biológicas establecidas, por ende, se los cataloga como no esenciales (Tchounwou et al., 2012).

En la Tabla 2.1 se presenta un resumen de las características principales y usos potenciales de cada uno de los elementos traza estudiados en la presente investigación.

Tabla 2.1: Características y usos de los elementos traza.
Fuente: Adriano (2001); EPA (2015); Marshall & Fairbridge (1999); Siegel (2002).

Nombre	Símbolo	Número atómico	Peso (u)	Densidad (gr/cm^3)	Valencia	Usos
Arsénico	As	33	74,9	5,73	-3	Medicinas, alimentación animal, pesticidas, compuestos electrónicos
Cadmio	Cd	48	112,411	8,64	+2	Baterías, plásticos, pigmentos, tuberías, fertilizantes
Cromo	Cr	24	51,996	7,19	+3	Metalurgia, alta resistencia a la corrosión
Cobre	Cu	29	63,546	8,96	+2	Tuberías, válvulas, juega un papel importante en reacciones bioquímicas esenciales para la vida
Mercurio	Hg	80	200,59	13,55	+2	Electricidad, fungicidas, catalizadores, farmacéutica
Níquel	Ni	28	58,69	8,9	+2	Industria metalúrgica, esencial para plantas
Plomo	Pb	82	207,19	11,4	+2	Baterías, soldadura, aleaciones, aditivos en gasolina
Zinc	Zn	30	65,39	7,13	+2	Esencial en industria, baterías, latas, estabilizadores de PVC

A continuación, se presenta un breve resumen de la producción y reserva a nivel mundial de cada uno de los metales en estudio, con la finalidad de comprender y magnificar la presencia de estos elementos traza en nuestro entorno:

- El As es el vigésimo elemento más abundante en la Tierra, y la producción a nivel mundial se estima que es de 60.000 T, siendo China el principal productor. El As se lo puede obtener de la fundición de Cu, Au y Pb, además del mineral arsenopirita.
- En cuanto al Cd, se le considera como el séptimo metal pesado más tóxico, y se origina a partir de la producción de Zn a una tasa entre 3 y 3,5 kg/T. La producción mundial de Cd refinado es de aproximadamente 22.500 T, siendo China y Corea del Sur los mayores productores de este metal. Al Cd se lo consume principalmente para la fabricación de baterías recargables.
- La producción mundial de Cr, ligado fuertemente a la extracción del mineral cromita, oscila en torno a los 42 millones de T anuales, siendo Sudáfrica uno de los principales productores con más del 40% del mercado, seguido de Kazakstán y Turquía. Las reservas de este metal se estiman en los 560 millones de T, concentradas geográficamente en los países ya mencionados.
- El Cu se encuentra generalmente asociado en la naturaleza con el azufre y ocupa el tercer lugar, después del hierro y aluminio, en cuanto a cantidades consumidas. La producción en mina y refinería de Cu suman 50 millones de T, siendo Chile y Perú los países líderes en este mercado, representando el 20% del mercado, por otro lado, las reservas se encuentran calculadas en 1.000 millones de T.
- El único metal que se encuentra en la naturaleza en tres formas: elemental, inorgánica y orgánica es el Hg, al cual se lo localiza mayoritariamente a lo largo de los límites de las placas. La producción actual es del orden de las 1.200 T, siendo China el país que más se destaca en esta actividad.
- Uno de los elementos de mayor abundancia en la corteza terrestre es el Ni, su extracción se lo hace a partir de lateritas y sulfuro magmático, la producción se encuentra en torno a los 4 millones de T y su reserva se estima en los 130 millones de T, siendo Indonesia el país con mayor producción de este metal.
- El Pb ha sido utilizado durante al menos 5.000 años, de color gris azulado, el cual se encuentra en pequeñas cantidades dentro de la corteza terrestre,

sin embargo, es vital dentro de la industria económica, derivado principalmente de los minerales: galena, cerusita y anglesita. Su producción actual se encuentra alrededor de los 4,5 millones de T y sus reservas se calculan en los 95 millones de T, siendo China y Australia los países que lideran en este mercado.

- Por último, el Zn es el 23º elemento más abundante en la corteza terrestre, y ocupa el 4º lugar entre todos los metales de producción mundial. Es extraído del mineral esfalerita y su producción es de aproximadamente 12 millones de T, siendo China, Australia y Perú los países que lideran en esta actividad. Por otro lado, las reservas de Australia sobrepasan los 64 millones de T, y a nivel mundial, existen reservas por 220 millones de T.

Los datos proporcionados anteriormente fueron recopilados en su gran mayoría del libro anual de minerales, elaborado por la USGS (2024) y complementados con Adriano (2001); Cremona & Orsenigo (2024); Jaishankar et al. (2014); Reyes et al. (2016).

2.2. Afectación a la salud humana

La consecuencia de la acumulación de metales en el organismo, debido a su incremento dentro del sistema alimenticio, como al consumo en bajas cantidades por un largo período de tiempo, puede traer consigo enfermedades crónicas o la muerte (Siegel, 2002).

Como se indicó en el capítulo anterior, fue en Japón donde se encontraron las primeras evidencias de personas afectadas debido a la contaminación de metilmercurio en los años 50 y de cadmio en los 60, además, en la India, para los años 80 y 90, el arsénico generó un estado de alarma entre sus pobladores (Adriano, 2001).

En España, en el año de 1998, la rotura de la balsa minera de Aznalcóllar, supuso una de las principales catástrofes socio ambientales, al originar un depósito de lodos cargados de metales pesados, que cubrió una superficie de 2.616 ha, afectando principalmente a campos agrícolas (Antón-Pacheco et al., 1999).

De igual forma, aquellas poblaciones que habitan cerca de pozos y estaciones petroleras presentan un peor estado general de salud en comparación a poblaciones que viven alejadas de esta actividad, siendo una de las razones la severa exposición

a los químicos disipados en las diferentes etapas del ciclo de vida del petróleo (San Sebastián et al., 2004).

A continuación (Tabla 2.2), se presentan las principales afecciones originadas en la salud humana, debido al consumo elevado de los metales pesados estudiados en la presente investigación:

Tabla 2.2: Afecciones a la salud humada originada por el consumo elevado de metales. Fuente: Compilado de varios autores.

Elemento traza	Afecciones a la salud humana
As	➢ Diversos síntomas gastrointestinales (Saha, J. C. et al., 1999) ➢ Problemas en los sistemas cardiovascular, renal y hepático (Medina-Pizzali et al., 2018) ➢ Afecciones de piel y cáncer de piel (Villaamil, 2015)
Cd	➢ Disfunciones renales y osteopenia (Kido et al., 1990) ➢ Cáncer de pulmón (Sorahan & Lancashire, 1997) ➢ Cáncer de próstata (Waalkes & Rehm, 1994)
Cr	➢ Dermatitis alérgica (Shelnutt et al., 2007) ➢ Asma y cáncer tracto respiratorio (Goyer & Clarkson, 1996)
Cu	➢ Afecciones gastrointestinales y daño hepático o renal (Feoktistova & Clark, 2018) ➢ Daño al hígado y riñones (Rodríguez Heredia, 2017)
Hg	➢ Toxicidad gastrointestinal (Tchounwou et al., 2012) ➢ Daños renales y afecciones neurológicas (Londoño-Franco et al., 2016)
Ni	➢ Inflamación pulmonar, asma y bronquitis (Suárez et al., 2014) ➢ Cáncer pulmonar (Andersen et al., 1996)
Pb	➢ Enfermedades cardiovasculares, retrasos en desarrollo físico o mental en niños (Londoño-Franco et al., 2016) ➢ Insuficiencia renal y afecciones al sistema nervioso central (Tchounwou et al., 2012)
Zn	➢ Déficit neuronal, afecciones gastrointestinales y elevado riesgo del cáncer de próstata (Plum et al., 2010)

2.3. Incidencia en suelos y en vegetación

La formación del suelo depende de la interacción de la atmósfera, hidrósfera y biósfera, específicamente de la meteorización de las rocas, de la topografía, del clima, y de la influencia de procesos microbiológicos. Bajo condiciones favorables, la formación del suelo puede alcanzar un equilibrio, caso contrario, si uno de estos parámetros varía, el equilibrio se fragmenta, pudiendo ser esto originado por la interacción con el hombre y el uso de la tierra. Este tipo de modificación negativa se denomina degradación o contaminación (presencia de concentraciones nocivas de elementos traza) (Galán & Romero, 2008).

Los sistemas que participan en la generación del suelo, más el propio suelo per se, pueden convertirse en vías de exposición de la contaminación, afectando seriamente a la diversidad de especies que viven o dependen del suelo (Figura 2.2) (Durães et al., 2017; Galán & Romero, 2008).

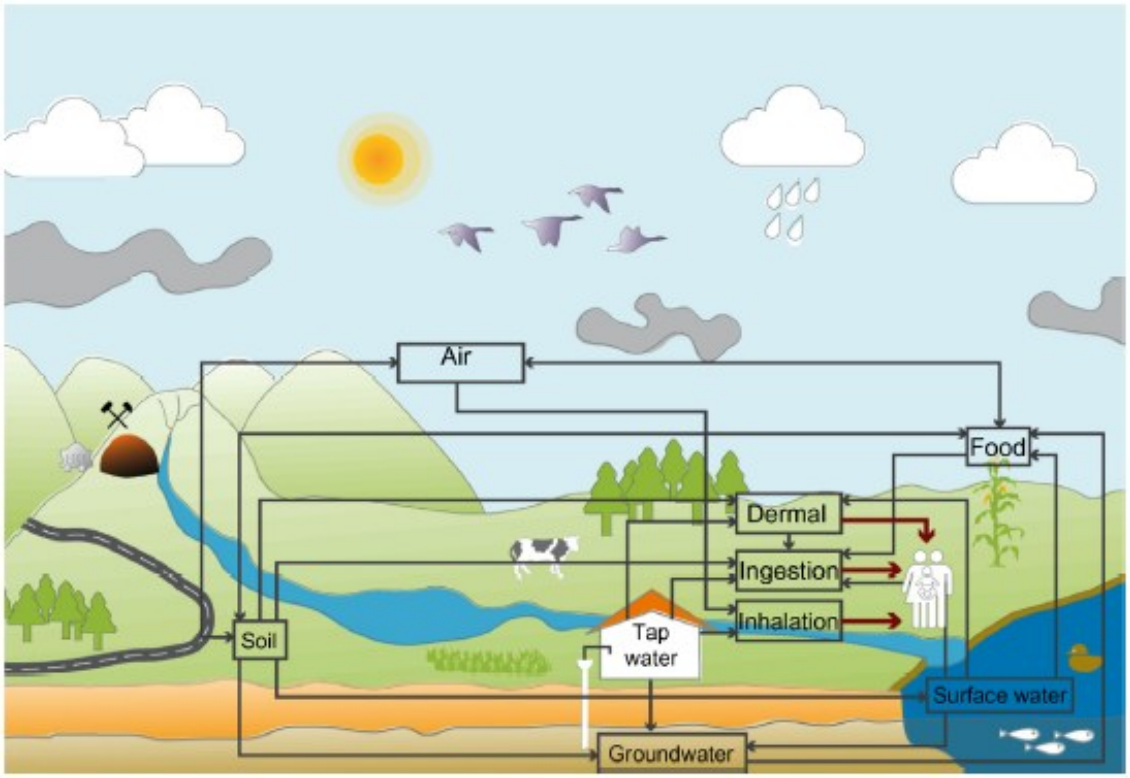


Figura 2.2: Principales vías de exposición de contaminación del suelo.
Fuente: Durães et al. (2017).

La peligrosidad de un contaminante en el suelo se encuentra determinada por su movilidad y disponibilidad, variables que son dependientes de parámetros edáficos: pH, textura y contenido de materia orgánica. En general, la movilidad de los elementos traza es muy baja, por ende, la capa más superficial del suelo ofrece mayores posibilidades de exposición de la contaminación a potenciales receptores, sobre todo, si los metales pesados se encuentran solubles en agua (de Miguel et al., 2002; Galán & Romero, 2008).

Los contaminantes biodisponibles pueden ser ingeridos o absorbidos por la vegetación, generando estrés en la misma, lo que ocasiona cambios metabólicos y morfológicos, por ejemplo, cambios en la tasa de fotosíntesis (respiración y transpiración), en la concentración absoluta o relativa de pigmentos (clorofila y

carotenoides), y en la estructura de las hojas (Arellano et al., 2015; Davids & Tyler, 2003).

Sin embargo, las plantas presentan barreras que influyen en el transporte de metales pesados, al igual que sucede en el suelo, por ejemplo: micorrizas (inmovilización de elementos traza en la raíz), pared celular (parte del flujo es retenido por la estructura de lignina y celulosa), membrana plasmática (involucrada en la tolerancia a metales pesados), etc. (Navarro-Aviñó et al., 2007).

Investigaciones en bioquímica y biomedicina han determinado que, ordinariamente los tejidos vegetales o animales presentan elementos traza o metales pesados en concentraciones inferiores al 0,01% de la masa total del organismo, siendo, por ejemplo, el As, Cr, Cu, Ni, Zn, entre otros, elementos esenciales para plantas, animales y/o para la nutrición humana (Adriano, 2001).

En la Tabla 2.3, se expone un breve resumen sobre las principales consecuencias del exceso de metales pesados en el suelo y en la cobertura vegetal:

Tabla 2.3: Consecuencia del exceso de metales pesados en suelo y vegetación.
Fuente: Compilado de Adriano (2001); Benavides et al. (2005).

Elemento traza	Suelo	Vegetación
As	El origen principal depende del material parental que se deriva el suelo, el cual es incrementado por pesticidas y defoliante en tierras agrícolas. En suelos de textura gruesa el As puede descender verticalmente, hasta una profundidad entre 40 y 80 cm. Existe una mayor retención de As en suelos arcillosos y carbonatados, además el As tiene una alta afinidad por superficies de óxido	Su distribución, en general, disminuye de la raíz al tallo y de la hoja a las partes comestibles. Especies como el diente de león se correlaciona con el contenido de As en suelo. El modo de acción principal del As en las plantas es la inhibición de la activación de la luz, generando clorosis, necrosis, deshidratación, cese del crecimiento y muerte
Cd	La concentración de Cd se encuentra influenciada por la roca madre: ígneas > metamórficas > sedimentarias. El Cd es generalmente bastante inmóvil en el perfil del suelo, residiendo entre los 0 y 15 cm. Adicionalmente, el grado de contaminación de suelo decrementa, cuando el pH incrementa	El Cd altera el consumo de minerales por parte de las plantas, afecta la apertura estomática, la transpiración y la fotosíntesis, presentando un retraso del crecimiento o clorosis, además, perturba la permeabilidad de la membrana plasmática causando una reducción en el contenido de agua. En general, el contenido de Cd en plantas decrece en el siguiente orden: raíces > tallo > hojas > frutos > semillas
Cr	Los suelos derivados de rocas ígneas ultramáficas contienen altos niveles de Cr, de igual forma aquellos suelos provenientes de lutitas. La cantidad de Cr en el suelo que está biodisponible para la planta es independiente de la	Se ha demostrado que el Cr no es esencial para el crecimiento normal de las plantas. Las concentraciones de Cr en el follaje de las plantas muestran poca relación con el Cr total en el suelo, por otro lado, las hojas suelen contener

Elemento traza	Suelo	Vegetación
	concentración total, en el suelo. No existe una regla en cuanto a la cantidad de Cr dependiendo de la profundidad	concentraciones más altas de Cr que el grano. Los niveles de 1 a 5 ppm de Cr son críticos para varias especies de plantas
Cu	El Cu persiste en el suelo porque está fuertemente complejo o absorbido por la materia orgánica, los óxidos de Fe y Mn y los minerales arcillosos. Por lo tanto, es uno de los metales traza menos móviles, lo que lo hace más uniformemente distribuido en muchos perfiles de suelo, acumulado mayormente en la hojarasca que recubre el perfil del suelo o en los primeros cm de la superficie del suelo	El Cu es uno de los siete micronutrientes tradicionales (Zn, Cu, Mn, Fe, B, Mo y Cl) esenciales para la nutrición normal de las plantas, pero en cantidades pequeñas (5 – 20 ppm en el tejido de las plantas). Los síntomas más comunes de toxicidad por Cu incluyen un vigor de crecimiento reducido, un sistema radicular mal desarrollado y descolorido, y clorosis foliar
Hg	Se espera que los suelos normales tengan niveles de Hg que no excedan de 100 ppb. Los procesos geológicos del material parental pueden influir en el contenido de Hg de los suelos. El contenido de Hg de un horizonte de suelo está relacionado directamente con el contenido de materia orgánica y/o arcilla de ese horizonte.	El Hg y sus compuestos son absorbidos por las raíces y translocados en una medida limitada a otras partes de la planta, sin embargo, el movimiento dentro del follaje, tallos y frutos es alto en comparación a las raíces. Un excedente en la cantidad de Hg puede originar retraso en el crecimiento de las plantas y la senescencia prematura
Ni	La fuente principal de Ni son las rocas ígneas. La concentración promedio a nivel mundial es de 20 ppm. En cuanto al perfil los valores de Ni a nivel superficial pueden ser relativamente más altos o tener concentraciones similares al subsuelo, dependiendo del material parental existente	Aunque el Ni es tóxico para los organismos en niveles elevados, se requieren cantidades mínimas de este elemento para varios procesos biológicos. El Ni que se acumula en las semillas se asocia principalmente con los cotiledones. Cuando las concentraciones de Ni en el tejido vegetativo superan las 50 ppm, las plantas pueden manifestar síntomas de toxicidad
Pb	Los procesos pedogenéticos, la topografía y las actividades microbianas pueden influir en la distribución de Pb en el perfil del suelo. En general, el Pb se acumula en la superficie del suelo, dentro de los primeros centímetros y disminuye con la profundidad	La mayor parte del Pb se acumula en las raíces, con niveles significativamente más bajos en los tallos y las hojas. La fitotoxicidad del Pb es relativamente baja en comparación con otros elementos traza
Zn	Los suelos formados a partir de rocas básicas están más enriquecidos con Zn. El contenido y la distribución de Zn en el perfil se han vinculado a diversos procesos y factores del suelo, como la meteorización, la materia orgánica, el contenido de arcilla y el pH	El zinc es un elemento esencial para la nutrición de las plantas, sin embargo, concentraciones en las hojas superiores a 100 ppm pueden dar como resultado una reducción del rendimiento o síntomas de fitotoxicidad similares a la clorosis férrica

En base a lo mencionado anteriormente, los metales pesados varían en función del material parental subyacente. Ross (1994) nos presenta las concentraciones típicas

de los elementos traza (µg/g) dependiendo del tipo de litología y del grado de meteorización (Figura 2.3).

	Rocas básicas			Rocas sedimentarias		
	Ultrabásicas	Básicas	Granito	Calcáreas	Areniscas	Esquistos
Cd	0,12	0,13-0,2	0,09-0,2	0,028-0,1	0,05	0,2
Co	110-150	35-50	1	0,1-4	0,3	19-20
Cr	2.000-2.980	200	4	10-11	35	90-100
Cu	10-42	90-100	10-13	5,5-15	30	39-50
Hg	0,004	0,01-0,08	0,08	0,05-0,16	0,03-0,29	0,18-0,5
Mn	1.040-1.300	1.500-2.200	400-500	620-1.100	4-60	850
Ni	2.000	150	0,5	7-12	2-9	68-70
Pb	0,1-14	3-5	20-24	5,7-7	8-10	20-23
Sn	0,5	1-1,5	3-3,5	0,5-4	0,5	4-6
Zn	50-58	100	40-52	20-25	16-30	100-120

Figura 2.3: Contenido (µg/g) de elementos traza en función de la roca.
Fuente: Peris Mendoza (2006).

Múltiples estudios han sido elaborados a nivel mundial para el estudio y determinación de elementos traza, por ejemplo: Sánchez-Camazano et al. (1994) estudiaron los contenidos de Pb y Cd en suelos y hortalizas en huertos urbanos de Salamanca, en donde encontraron concentraciones medias 2,6 y 2,7 veces superior, respectivamente, a la de los suelos naturales de la provincia, además, concluyeron que los niveles de Pb se relacionan con la densidad del tráfico, y los niveles de Cd con la distancia a carreteras, edad del huerto y flujo de visitantes.

Adicionalmente, McClintock et al. (2012); Medina-Pizzali et al. (2018) mencionan que el agua en diferentes ciudades de Latinoamérica presenta altos niveles de As, estimando que por lo menos 4,5 millones de personas se ven afectadas por este hecho, de igual forma, Adriano (2001); Reyes et al. (2016) reportan que, algunas poblaciones de Europa y América del Norte, se encuentran expuestas a Cd debido a la contaminación de hojas de vegetales, granos, cereales, frutas, vísceras de animales y pescado, alcanzando una ingesta diaria entre 10 y 40 µg/día. Jaishankar et al. (2014) indican que, una de las ciudades más afectadas por Cr fue Tokio, en 1975, presentando valores 2.000 veces superior al límite permisible, y, actualmente ciudades de la India presentan valores altos de Cr en el agua subterránea. En cuanto al Cu, uno de los ejemplos latentes fue lo suscitado por la actividad minera y fundición en Sudbury, Canadá, en donde alrededor del 40% del total de este metal emitido se depositó dentro de un radio de 60 km, caso similar sucedió en la región de Alcácer do Sal en Portugal, donde la contaminación por Cu

en las partes bajas del río Sado puso en peligro la producción de trigo, así como la pesca y el cultivo de ostras en el estuario (Adriano, 2001).

En el Ecuador se han realizado varios estudios de campo y laboratorio, en diferentes localidades, con la finalidad de determinar la presencia o no de metales pesados, por ejemplo: Félix et al. (2002) investigaron los metales Cd, Zn y Pb en los cultivos de exportación como banano, cacao, café, palma africana y plátano, obteniendo como resultado cantidades elevadas de Cd en las provincias de El Oro y Los Ríos; Rodríguez & Alvarado (2015) estudiaron los metales Zn, Cd, Pb y Cu en los sedimentos del estero Huaylá, encontrando concentraciones por encima de los límites permisibles; Carrera-Quispe (1994) determinó altas concentraciones de Cd en plantaciones de cacao (> 1 mg/kg), sobre todo en los cantones Santa Rosa, Tenguel, Chone y Naranjal, además, menciona que no existe una relación estadística entre el contenido de este elemento en suelo, con el contenido en hojas adultas y jóvenes, cáscara, y almendras.

Otro ejemplo es el estudio realizado por Mite et al. (2010) los cuales encontraron en fincas cacaoteras de las provincias de El Oro, Guayas y Azuay, altas concentraciones de Cd, con valores superiores a 1,5 ppm en la almendra, y, a 4,0 ppm en la testa, además, infirieron que la cantidad de Cd que se encuentra en la testa del cacao, no es un indicativo sobre la cantidad de esta traza en la almendra, por lo general, el contenido de Cd en la testa (desechada al momento de elaborar el chocolate) es siempre mayor que en el cotiledón.

Hewitt & Candy (1990), estudiaron a los metales Pb, Cd y Zn en la ciudad de Cuenca, concluyendo que las concentraciones de metales pesados en un entorno urbano son considerablemente superiores a las que se encuentran fuera de la ciudad.

Como se puede evidenciar, existen diversos estudios espacio-temporales, centrados en la cuantificación de los metales pesados, debido a la importancia que los mismos tienen en la identificación de fuentes de contaminación, prevención de riesgos para la salud humana y ambiental y en la implementación de estrategias de remediación.

2.4. Normativa

A nivel mundial existen varios estándares y directrices que guían la regulación de metales pesados en suelos, agua y alimentos, entre los cuales se encuentran:

- Organización Mundial de la Salud (OMS), la cual establece directrices sobre la calidad de agua potable y aire, incluyendo límites permisibles para diferentes elementos traza (OMS, 2011).
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés), institución que propone, mediante su comité de expertos JECFA, el denominado Codex Alimentarius, en donde se estipulan límites máximos permisibles de elementos traza en alimentos (cereales, pescados, vegetales, etc.) para proteger la salud pública (JECFA, 2020).
- Unión Europea, reglamentos generados dentro de la Comisión Europea, para regular el consumo máximo de metales pesados en productos alimenticios, por ejemplo, para el Cd (Comisión Europea, 2014), por otro lado, la Comisión regula la producción y uso de sustancias químicas, incluyendo metales pesados.
- Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés), establece estándares para la concentración de metales pesados en agua potable (EPA, 2015), además, emite normas para la gestión de residuos que contienen metales pesados.
- Organización Internacional de Normalización (ISO, por sus siglas en inglés), la cual establece diferentes métodos de análisis para la determinación de metales pesados en aguas (ISO 17294-1) y suelos (ISO 11466).

Algunos países poseen su propia normativa y regulaciones, las cuales se alinean con las directrices internacionales ya mencionadas, por ejemplo:

- Canadá, mediante el Consejo Canadiense de Ministros de Medio Ambiente (CCME, por sus siglas en inglés), establece regulaciones de salud ambiental sobre la exposición a metales pesados (CCME, 2024).
- En España, algunas Comunidades Autónomas han determinado sus propios niveles de fondo (concentraciones naturales de metales pesados) y referencia (límites permisibles de elementos traza) dentro de sus límites territoriales, por ejemplo, la Comunidad Autónoma de Madrid (de Miguel et al., 2002).
- Brasil, cuenta con regulaciones específicas, por ejemplo, la resolución CONAMA 420/2009, la cual establece criterios para el control de contaminantes en el suelo, en áreas urbanas, agrícolas y forestales.

- En Ecuador, el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE) regula la calidad de suelo y agua, mediante el Libro VI de la Calidad Ambiental, donde se establecen los límites permisibles de metales pesados (MAATE, 2015). Por otro lado, en cuanto a los límites en alimentos, se sigue la normativa del Codex Alimentarius.

A continuación, se presenta una recopilación realizada de los límites permisibles de metales pesados en agua, suelo y alimentos, obtenida a partir de las fuentes bibliográficas mencionadas dentro de este apartado:

- Agua (Tabla 2.4):

Tabla 2.4: Límites permisibles de metales pesados en agua potable (mg/l).
Fuente: Compilado de OMS (2011); Siegel (2002).

Elemento traza	**Agua potable (mg/l)** (OMS, 2011)	**Agua potable (mg/l)** (Siegel, 2002)
As	0,01	0,05
Cd	0,003	0,003
Cr	0,05	0,05
Cu	2,0	1,0
Hg	0,006	0,001
Ni	0,07	0,02
Pb	0,01	0,002
Zn	3,0	5,0

- Aire (Tabla 2.5):

Tabla 2.5: Límites permisibles de metales pesados en aire (µg/m^3).
Fuente: Compilado de Siegel (2002).

Elemento traza	**Aire (µg/m^3)**
As	0,01
Cd	0,001
Cr	100,0
Cu	0,01
Hg	0,01
Ni	0,002

Elemento traza	Aire (µg/m³)
Pb	1,0
Zn	-

- Suelo (Tabla 2.6):

Tabla 2.6: Límites permisibles de metales pesados en suelo (mg/kg).

Fuente: Compilado de CCME (2024); de Miguel et al. (2002); Galán & Romero (2008)

Elemento traza	Agrícolas (mg/kg) (Galán & Romero, 2008)	Agrícolas (mg/kg) (CCME, 2024)	Madrid – Referencia (mg/kg) (de Miguel et al., 2002)	Andalucía – Referencia (mg/kg) (Galán & Romero, 2008)
As	20,0	12,0	24,0	36,0
Cd	1,0	1,4	0,22	-
Cr	50,0	64,0	32,0	120,0
Cu	50,0	63,0	20,0	48,0
Hg	2,0	6,6	0,065	-
Ni	30,0	50,0	21,0	56,0
Pb	50,0	70,0	30,0	67,0
Zn	150,0	200,0	73,0	119,0

- Alimentos (Tabla 2.7):

Tabla 2.7: Límites permisibles de metales pesados en alimentos (mg/kg).

Fuente: Compilado de Comisión Europea (2014)

Elemento traza	Carne, hortalizas y frutas (mg/kg)	Pescado (mg/kg)	Crustáceos (mg/kg)	Cereales y legumbres (mg/kg)	Cacao (mg/kg)	Complemento alimenticio (mg/kg)
As	-	-	-	0,2	-	-
Cd	0,05	0,1	0,5	0,04 - 0,1	0,3 - 0,8	3,0
Cr	-	-	-	-	-	-
Cu	-	-	-	-	-	-
Hg	0,05	1,0	-	-	-	0,1
Ni	-	-	-	-	-	-

Elemento traza	Carne, hortalizas y frutas (mg/kg)	Pescado (mg/kg)	Crustáceos (mg/kg)	Cereales y legumbres (mg/kg)	Cacao (mg/kg)	Complemento alimenticio (mg/kg)
Pb	0,1	0,3	0,5	0,2	-	3,0
Zn	-	-	-	-	-	-

- Ingesta en seres humanos (Tabla 2.8):

Tabla 2.8: Límites permisibles de metales pesados en seres humanos.
Fuente: Compilado de EFSA (2020); JECFA (2020)

Elemento traza	Ingesta (JECFA, 2020)	Ingesta (EFSA, 2020)	Unidades
As	15,0	-	µg/kg bw/week
Cd	25,0	-	µg/kg bw/month
Cr	-	0,3	mg/kg bw/day
Cu	0,5	-	mg/kg bw/day
Hg	4,0	-	µg/kg bw/week
Ni	-	13,0	µg/kg bw/day
Pb	0,025	-	mg/kg bw/week
Zn	0,3	-	mg/kg bw/day

2.5. Mitigación y reducción de efectos negativos

Diversas investigaciones han concluido que las técnicas de fitoestabilización y fitoextracción son eficaces para remover y/o reducir metales pesados como Pb, Cu, Cd, Zn, entre otros (Fresno Garcia, 2017). Las especies vegetales identificadas con capacidad de absorción de Pb incluyen: aromo, fréjol, amaranto silvestre y remolacha. Específicamente, para la absorción de Cd destacan: altamisa, girasol y nabo. En cuanto al Zn, las especies más efectivas son: colza, tomate riñón y pasto. Para la absorción de Cu se mencionan las especies: altamisa y acacia (Reyna Mandujano, 2023).

La eficiencia de las técnicas de fitorremediación está condicionada principalmente por la especie vegetal utilizada. Las especies nativas suelen mostrar una mayor capacidad tanto para la fitorremediación como para la acumulación de metales pesados, lo que las convierte en opciones óptimas para la remediación de suelos

contaminados. Este enfoque ofrece una alternativa sostenible y respetuosa con el medioambiente, facilitando la recuperación de ecosistemas afectados por metales tóxicos (Reyna Mandujano, 2023).

En el caso de los cacaotales, existen algunas estrategias para mitigar la presencia de Cd. En primer lugar, si las plantaciones son nuevas, se recomienda suelos con valores de Cd menores a 1,4 mg/kg, ubicados lejos de carreteras, botaderos y/o zonas mineras. Para plantaciones ya existentes, se proponen medidas como la de aumentar los niveles de Zn y Mn en el suelo, aplicar encalado con dolomita para elevar el pH, incrementar la materia orgánica con fertilizantes orgánicos, evitar fertilizantes fosfatados que puedan contener Cd. También se sugiere el uso de carbono activado para disminuir la disponibilidad de Cd en suelo, así como la aplicación de vinaza para fomentar el desarrollo de micorrizas que mejoran la nutrición de fósforo, este proceso ha demostrado ser efectivo en la reducción de la concentración de Cd en el cacao (Alvarez Morales et al., 2021).

Otra técnica eficaz, empleada en Colombia y Ecuador, es la fitoextracción, que consiste en sembrar especies vegetales, las cuales poseen la capacidad de acumular y tolerar altas concentraciones de metales en el tejido cosechable, y posteriormente, sus hojas son quemadas. Puntualmente en las localidades mencionadas se suele sembrar moringa para la eliminación de metales pesados (Casteblanco, 2018).

En el cultivo de arroz, los enfoques agronómicos para la mitigación de metales pesados incluyen técnicas físicas, químicas y biológicas para minimizar los efectos negativos en el crecimiento de las plantas y reducir la absorción de estos metales por las raíces. Los métodos físicos incluyen la rotación de suelo, dilución y transferencia eléctrica, aunque estas prácticas pueden reducir el carbono orgánico y la capacidad de retención de agua en el suelo. En cuanto a la estabilización química, se utilizan fosfatos, cal y materia orgánica para disminuir la movilidad de los metales pesados. El uso de biochar es otra técnica que reduce la biodisponibilidad de los metales, gracias a su estructura y alto pH, que favorecen la retención de metales. Finalmente, la fitorremediación (explicada anteriormente) y el uso de materia orgánica son métodos biológicos eficaces que promueven la disminución de metales pesados mediante plantas y microorganismos, siendo una solución más sostenible desde el punto de vista ambiental (Bayona-Penagos, 2020).

La FAO desarrolló la ilustración titulada “Suelos sanos para una vida sana”, en donde se resalta por un lado la importancia de mitigar y reducir los efectos adversos de la degradación de los suelos, sobre todo por la incidencia de metales

pesados, y, por otro lado, la necesidad de conservar la calidad del suelo para garantizar cultivos seguros y libres de contaminación, promoviendo así la producción de alimentos nutritivos y seguros para las personas FAO (2015).

2.6. Proyectos de cooperación y colaboración interinstitucional

Existen varios programas y proyectos de cooperación y colaboración enfocados en la gestión de la contaminación por metales pesados, muchos de ellos liderados por organizaciones internacionales, por ejemplo:

- Fondo Mundial para el Medio Ambiente (GEF, por sus siglas en inglés), fondo global que financia proyectos para la reducción de la contaminación, incluyendo temas de metales pesados. Uno de sus proyectos fue aplicado en Ecuador para la reducción de Mercurio (IISD, 2014).
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), mediante su iniciativa para la contaminación de metales pesados, la cual trabaja en la identificación, reducción y monitoreo de los impactos de los metales pesados en el ambiente (Gobierno de México, 2015).
- Programa Internacional sobre Seguridad Química (IPCS, por sus siglas en inglés), este programa internacional nace a partir de la OMS y el PNUMA, encargado de desarrollar guías y marcos normativos para la evaluación y manejo de riesgos asociados a metales pesados.
- *Partnership for Action on Green Economy* (PAGE), esta asociación incluye agencias de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), la cual apoya a países en transición hacia una economía verde.

Dentro de Ecuador existen algunas iniciativas orientadas a la mitigación y reducción de metales pesados, por ejemplo:

- Las entidades Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP), Sociedad Alemana de Cooperación Internacional (GIZ, por sus siglas en alemán), Corporación de Promoción de Exportaciones e Inversiones (CORPEI) y ANECACAO han unido esfuerzos para definir medidas de prevención y remediación de la contaminación, en aquellas zonas agrícolas, principalmente en áreas cacaoteras con problemas de acumulación de metales pesados, originadas principalmente por actividades antropogénicas:

explotación de minas, quema de basura, uso de agroquímicos, gases industriales, derrames de petróleo, etc. (Mite et al., 2010).

- El programa MOCCA "Maximizando Oportunidades para Café y Cacao en las Américas" cuenta con una caja de herramientas, validada con expertos internacionales, para mantener la calidad del cacao, evitando afecciones por metales pesados. Esto tuvo el apoyo de instituciones como la Escuela Politécnica del Litoral (ESPOL) y el MAG (MOCCA, 2021).
- La GIZ y la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) han desarrollado un proyecto, en el cual se considera a Ecuador, con la finalidad de implementar estándares internacionales para la reducción de impactos ambientales por parte de la minería (GIZ, 2021).

3. ESPECTROMETRÍA DE IMAGEN

"La gran meta de la educación no es el conocimiento, sino la acción"

(Herbert Spencer)

CONTENIDO:

3.1.	Introducción a la espectrometría de imagen	30
3.2.	Firmas espectrales	32
3.3.	Técnicas para localización y mapeo de elementos traza	39

3.1. Introducción a la espectrometría de imagen

En este capítulo se aborda la espectrometría de imagen como herramienta clave para identificar metales pesados en el ambiente, destacando técnicas como el ACP e índices espectrales. También se citan investigaciones científicas que evidencian su eficacia al combinar métodos geoespaciales con datos de campo, consolidando un enfoque innovador en este estudio. Cabe mencionar que, se ha incluido un apartado en el Anexo B que aborda los conceptos fundamentales relacionados con la teledetección.

Según Shin et al. (2020), la espectrometría es una técnica no destructiva, económica, repetible y superior a los métodos tradicionales de muestreo de campo, además, es considerada como un método efectivo a la hora de determinar contenido de humedad y concentraciones de metales pesados en suelo, sin embargo, los elementos trazas pueden traslaparse con características de absorción de óxidos de hierro, materia orgánica, agua y minerales arcillosos (Tabla 3.1).

Tabla 3.1: Características de absorción en la reflectancia espectral.
Fuente: Adaptado de Shin et al. (2020).

Componente	Longitud de onda de absorción
Fe^{3+}	≈ 900 nm
Fe^{2+}	≈ 1000 – 1200 nm
OH	≈ 1400 nm (también ~ 1550 nm, y ~ 1750 – 1850 nm)
H_2O	≈ 1400 nm y 1900 nm
AlOH	≈ 2160 – 2228 nm
FeOH	≈ 2230 – 2298 nm
MgOH	≈ 2300 – 2370 nm
CO_3	≈ 2330 – 2370 nm (también 1870 nm, 1990 nm y 2155 nm)
Organic matter	≈ 350 – 500 nm

Arellano et al. (2015); Rosso et al. (2005) manifiestan que uno de los fines de la espectrometría, ya sea mediante el uso de datos espectrales o información hiperespectral, es la medición y monitoreo de zonas contaminadas. Su detección, en paisajes con vegetación, se fundamenta en las diferencias que presentan las reflectancias de las hojas con respecto a la vegetación circundante, las cuales están

relacionadas con las propiedades bioquímicas y biofísicas (pigmentación, estructura de la hoja, etc.).

Meza et al. (2020); Rodríguez-Pérez et al. (2021); Soca-Muñoz et al. (2020) indican que esta técnica tiene un amplio beneficio para estudios de agricultura de precisión, permitiendo a los agricultores refinar la fertilización, evaluar el estado nutricional de los cultivos, controlar la irrigación, y/o detectar cambios fisiológicos en las especies vegetales por plagas o enfermedades; a partir del uso de algoritmos u operaciones para la determinación de parámetros agroforestales (actividad fotosintética, estrés hídrico, nivel de productividad, etc.).

Uno de los procesos clave para la espectrometría de imagen es la adquisición de datos en diversas longitudes de onda, lo que permite identificar características específicas del terreno y la vegetación. A continuación (Tabla 3.2), se presenta un resumen de múltiples sensores satelitales que pueden ser empleados para abordar este tipo de estudios:

Tabla 3.2: Resumen de sensores empleados en teledetección.

Fuente: Compilado de ESA (2024b)

Sensor	Resolución espacial	Resolución espectral	Resolución temporal	Cobertura espectral	Aplicaciones destacadas
Sentinel-2	10 m (óptico), 20 m (infrarrojo de onda corta)	13 bandas	5 días	443-2190 nm	Monitoreo de vegetación, índices espectrales, y estudios ambientales
Landsat 8/9	30 m (multiespectral), 15 m (pancromático)	11 bandas (incluye pancromática)	16 días	443-1373 nm	Estudios de uso del suelo, hidrología y temperatura superficial
PRISMA	30 m	234 bandas	7 días	400-2505 nm	Identificación espectral detallada, geología, y análisis de calidad
WorldView-3	1.24 m (multiespectral), 0.31 m (pancromático)	16 bandas	1-4 días (dependiendo de la latitud)	400-2500 nm	Análisis detallado de vegetación, precisión en mapas y detección de objetos

Las investigaciones realizadas en Ecuador sobre espectrometría son escasas, una de ellas es la realizada por Alcocer (2017), en la cual determinó que la firma espectral en plantaciones de cacao sobre pasivos ambientales presenta una menor reflectividad entre los 700 y 1200 nm, y una menor absortividad en el infrarrojo de onda corta, en comparación a cultivos de la misma especie sin presencia de contaminación (Figura 3.1). Otra de las investigaciones es la realizada por Mora &

Cañarte (2017), en donde caracterizaron espectralmente a la quinua, distinguiendo variaciones en las firmas de un ensayo controlado versus un cultivo de tipo comercial.

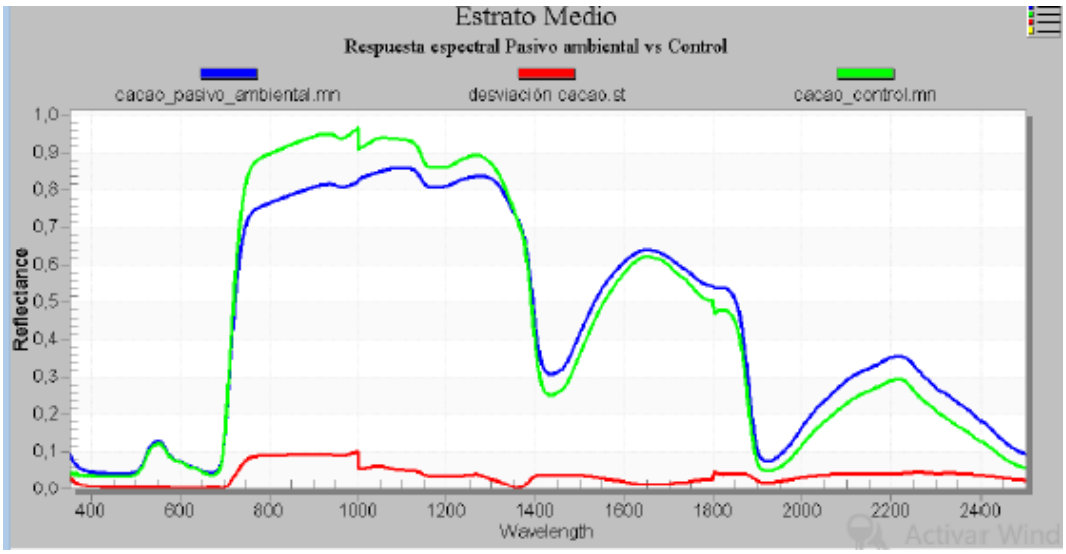


Figura 3.1: Firma espectral del cacao de dos localidades.
Fuente: Tomado de Alcocer (2017).

A continuación, se abordan los términos claves que se relacionan con el proceso de espectrometría de imagen, tales como firmas espectrales, librerías espectrales y técnicas de localización y mapeo. Comprender estos conceptos es fundamental para interpretar y aplicar correctamente los datos espectrales obtenidos en estudios científicos y aplicaciones prácticas.

3.2. Firmas espectrales

Las distintas coberturas u objetivos, en función de su composición, presentan características únicas de reflejar o emitir energía en distintas longitudes de onda, a lo que se denomina como firmas espectrales, siendo la base para la diferenciación de distintas superficies a partir de la información capturada por los sensores remotos. Sin embargo, las mismas se encuentran influenciadas por factores externos, por ejemplo: ángulos de iluminación y observación, modificaciones por el relieve, influencia de la atmósfera, variaciones ambientales, etc. (Chuvieco, 2010).

Las firmas espectrales han sido de amplia utilidad en estudios relacionados con coberturas vegetales, por ejemplo: contaminación de hojas de caña de azúcar (Soca-

Muñoz et al., 2020), estrés por salinidad en el arroz (Das et al., 2020), productividad en viñedos (González Fernández et al., 2010), estrés hídrico en el pepino dulce (Meza et al., 2020), acumulación de nitrógeno en trigo (Yao et al., 2010), entre otros.

Nosetto et al. (2003) mencionan que la firma espectral constituye una herramienta adecuada para la identificación y diferenciación de coberturas vegetales en un momento específico. En el caso hipotético de trabajar con imágenes de distintas épocas, se hace imprescindible una homogeneización previa de las mismas, con la finalidad de que la reflectividad de cada píxel pueda ser comparable e independiente del momento en la que se obtuvo.

3.2.1. Reflectividad de superficies

a. Vegetación

De manera general, una hoja saludable muestra características únicas que difieren en función de la porción del espectro electromagnético. El pigmento de las hojas tiene un rol principal en el rango visible (0,4 – 0,7 μm) debido al contenido de clorofila a y b, carotenos y xantofila. Dentro del infrarrojo cercano (0,7 – 1,2 μm), el proceso de dispersión se encuentra dominado por la reflectancia y transmitancia, las cuales dependen de la estructura interna de la hoja, así como de la cantidad de espacio en el mesófilo. Por último, en el infrarrojo de onda corta (1,2 – 2,5 μm), se origina una mayor absorción de luz debido al contenido de agua en la hoja, específicamente en las longitudes de onda 1,4, 1,9 y 2,7 μm (Figura 3.2) (Gilabert et al., 2010).

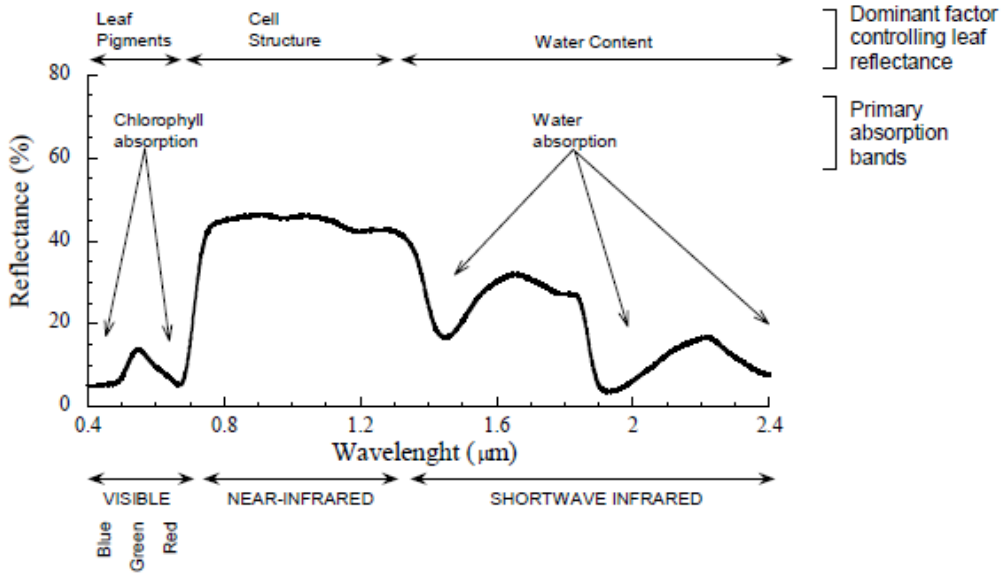


Figura 3.2: Reflectancia de una hoja sana.
Fuente: Tomado de Gilabert et al. (2010).

Cabe mencionar que, el estrés que sufre la hoja origina un desplazamiento en el límite del rojo (*red edge*) (0,70 – 0,74 μm), hacia longitudes de onda más cortas, como consecuencia del incremento de la clorofila a y b, y por la disminución de los carotenoides; esto se evidencia cuando existe la presencia de metales pesados (Chuvieco, 2010). Rosso et al. (2005) encontraron una variabilidad de la reflectancia cuando una planta es afectada por Cd, mostrando en el espectro visible un incremento de la reflectividad cuando existe la presencia de este elemento, en cambio, en el infrarrojo cercano sucede lo contrario, ya que esta porción del espectro refleja la estructura de la hoja per se.

b. Suelos

El comportamiento espectral de los suelos es mucho más uniforme que el de la vegetación, mostrando un aumento en la reflectividad a medida que incrementa la longitud de onda, sin embargo, variables como la textura, contenido de agua, cantidad de materia orgánica, presencia de hierro, rugosidad y composición molecular, influyen en la firma espectral, presentando rasgos distintivos de absortividad y reflectividad, lo que permite estudiar y caracterizar diferentes materiales mediante el empleo de técnicas espectrométricas (Clark, 1999; Rejas et al., 2014; Sobrino et al., 2001). En la Figura 3.3 se presentan ejemplos de firmas

espectrales de minerales, en donde se evidencian variaciones en la reflectividad debido a su composición química.

En suelos con presencia de cobertura vegetal no resulta sencillo obtener información edafológica y/o litológica debido al efecto pantalla que genera la misma, por ende, se emplean métodos indirectos para extraer mencionadas características físicas (Chuvieco, 2010).

A partir del análisis mineralógico que realizaron Shin et al. (2020), concluyen que, la presencia de minerales primarios y secundarios, controla u origina variaciones (absortivas o reflectivas) en determinados rangos de las firmas espectrales de los suelos con presencia de metales pesados, lo que hace posible su caracterización.

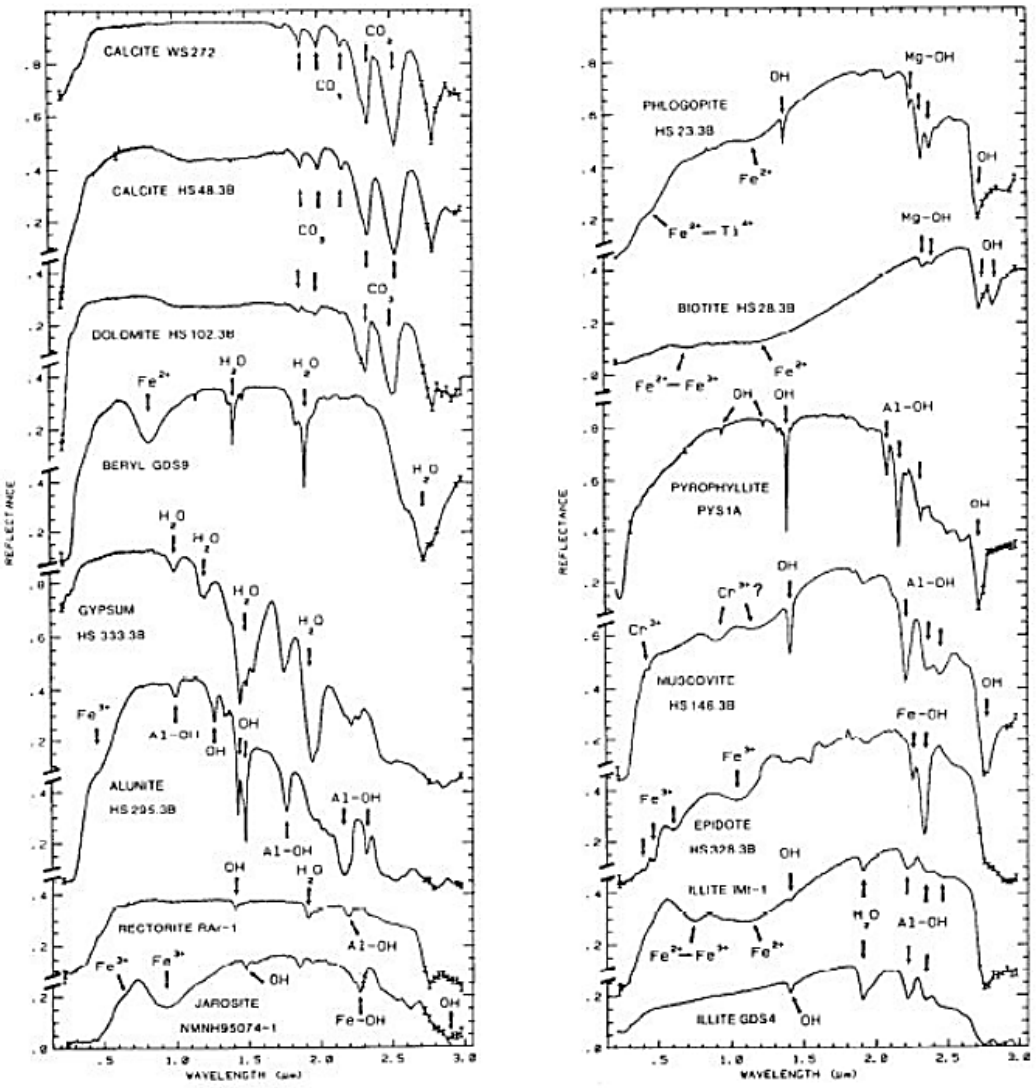


Figura 3.3: Características de absorción comunes en firmas espectrales de minerales. Fuente: Tomado de Clark (1999).

Recapitulando, la diversidad de especies vegetativas, los distintos tipos de suelo, las variaciones estacionales, sumado a la presencia de elementos traza, influyen directamente en la reflectividad de las superficies, modificando y/o presentando variaciones en las firmas espectrales (Kooistra et al., 2003).

3.2.2. Librerías espectrales

El crecimiento de la teledetección hiperespectral ha venido acompañado de la creación de bibliotecas espectrales, las cuales son bases de datos que contienen las firmas de diversos materiales, capturadas con espectrorradiómetros ya sea en campo o en laboratorio, a partir de sitios representativos. Estas firmas son útiles para conocer el comportamiento o estado de una determinada cubierta.

Algunas de las bibliotecas espectrales, disponibles para la comunidad de teledetección y administradas por agencias gubernamentales, son las desarrolladas por: USGS, Jet Propulsion Laboratory (JPL), Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA), etc., las cuales incluyen información relativa a minerales, rocas, suelos, vegetación, meteoritos, agua, nieve y cubiertas humanas. Por otro lado, existen Universidades que han desarrollado también bibliotecas, por ejemplo: Universidad de Purdue, Universidad de California, Universidad de Alcalá, entre otras (Chuvieco, 2010; Kim et al., 2020).

El mantenimiento de las bibliotecas espectrales, requiere de un esfuerzo especializado para poder llevar los datos a un formato común, para que puedan ser empleados por la comunidad (Campbell & Wynne, 2011).

3.2.3. Transformaciones

Con la finalidad de reducir o eliminar información poco relevante de los datos capturados, y para mejorar la interpretabilidad y resaltar características específicas de los materiales analizados, se aplican transformaciones u operaciones matemáticas para dicho fin.

A continuación, y en función de: Camo Analytics (2024); Wang et al. (2018), se mencionan algunas de las más importantes:

a. Derivadas

El cálculo de derivadas de varios órdenes se utiliza ampliamente en aplicaciones espectroscópicas, sobre todo para corregir los efectos de línea base: iluminación variable, condiciones atmosféricas y características físicas de la superficie, y, por

otro lado, ayudan a enfatizar pequeñas variaciones espectrales que no son evidentes en los datos crudos.

La primera y segunda derivada son las más utilizadas en espectroscopía, ya que ayudan a resaltar picos y valles, permitiendo de esta forma identificar bandas de absorción y transiciones espectrales importantes (Figura 3.4). En cambio, la tercera y cuarta derivada, enfatizan pequeñas variaciones de temperatura y cambios de composición.

La primera (Ecuación 3.1) y segunda derivada (Ecuación 3.2) espectrales son calculadas de la siguiente forma:

Ecuación 3.1

$$\rho'_{(\lambda,k)} = \frac{\rho_{(\lambda,k+1)} - \rho_{(\lambda,k-1)}}{2\Delta\lambda}$$

Ecuación 3.2

$$\rho''_{(\lambda,k)} = \frac{\rho_{(\lambda,k+1)} - 2\rho_{(\lambda,k)} + \rho_{(\lambda,k-1)}}{\Delta\lambda^2}$$

Donde $\rho'_{(\lambda,k)}$ y $\rho''_{(\lambda,k)}$, son la primera y segunda derivada de la reflectancia respectivamente, en la longitud de onda k (punto medio entre bandas k+1 y k-1), $\rho_{(\lambda,k+1)}$ es la reflectividad en la banda k+1, $\rho_{(\lambda,k-1)}$ es la reflectividad en la banda k-1, y es la diferencia de longitud de onda entre las bandas k y k+1.

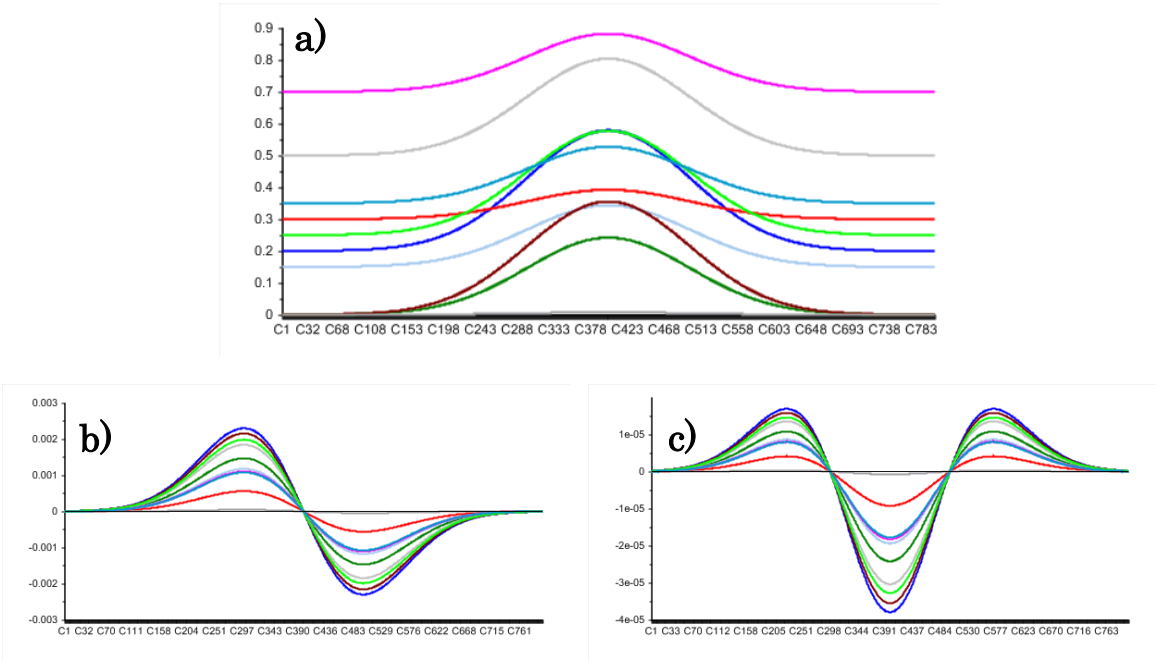


Figura 3.4: Firmas de: a) curvas gaussianas de diversas intensidades; b) primera derivada; c) segunda derivada.

Fuente: Tomado de Camo Analytics (2024).

En la primera derivada (Figura 3.4b) se puede evidenciar que el desplazamiento de la línea base se ha eliminado mediante la diferenciación, y los picos máximos en los datos crudos se han convertido en cero, lo que puede generar un grado de dificultad elevado su interpretación, por ende, es de utilidad en este caso, la utilización de la segunda derivada (Figura 3.4c), la cual no se ve afectada por ninguna "inclinación" lineal que pueda existir en los datos, eliminando de esta forma el desplazamiento de la línea base y la pendiente en una firma espectral (Camo Analytics, 2024).

b. Eliminación de tendencias

Este algoritmo busca eliminar las tendencias no lineales en las firmas espectrales, reduciendo de esta forma la multicolinealidad, el desplazamiento de la línea base y la curvatura. A medida que se aumenta el orden polinomial, se eliminan efectos de línea base adicionales, por ejemplo, grado 0: corrige desplazamiento, grado 1: desplazamiento y pendiente, grado 2: desplazamiento, pendiente y curvatura.

En la Figura 3.5a muestra una clara tendencia no lineal como se resalta en la curva roja. En la Figura 3.5b se presentan los mismos datos después de aplicar la eliminación de tendencia con polinomio de grado 1.

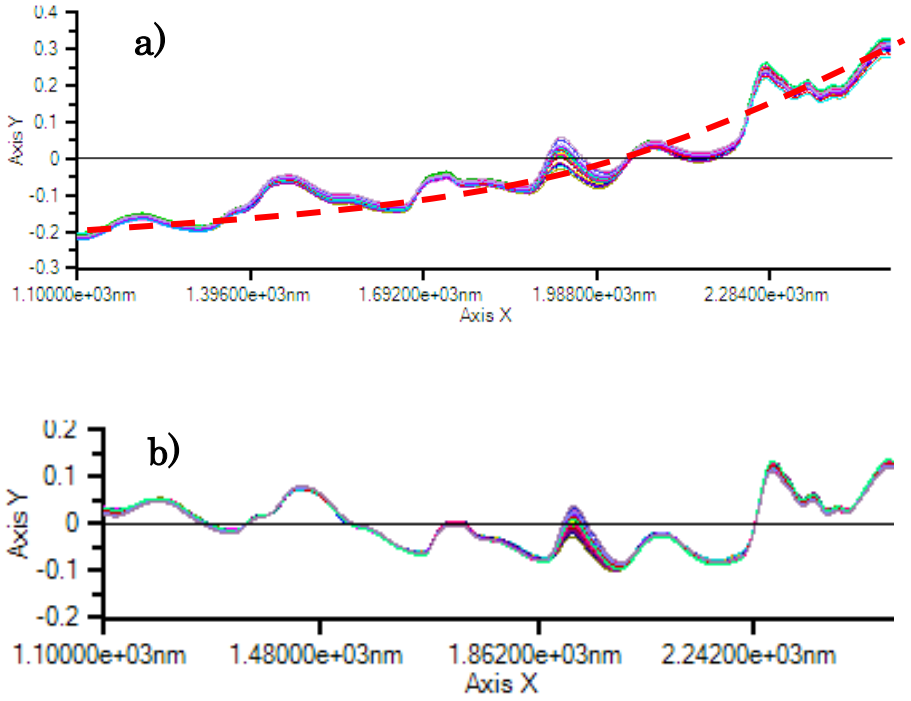


Figura 3.5: Firmas con: a) tendencias no lineales; b) tendencias eliminadas.

Fuente: Tomado de Camo Analytics (2024).

c. Suavizado

Estos métodos permiten eliminar ruido o los picos existentes en los datos espectrales, mediante transformaciones orientadas, esto quiere decir que el valor de un punto depende de sus vecinos próximos. Entre los métodos más relevantes se tiene a: Promedio móvil, filtro gaussiano, filtro de mediana y Savitzky-Golay.

El algoritmo de Savitzky-Golay, ajusta un polinomio a segmentos de curva sucesivos, y reemplaza los valores originales con los valores de los polinomios estimados, manteniendo la información espectral como se muestra en la Figura 3.6.

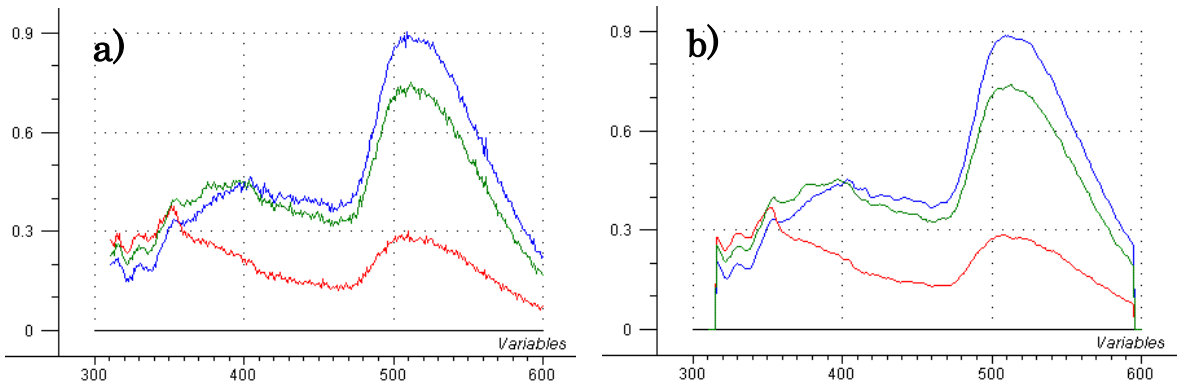


Figura 3.6: Firmas con: a) ruido; b) suavizado Savitzky-Golay.
Fuente: Tomado de Camo Analytics (2024).

Para verificar la importancia de las transformaciones, se puede tomar como ejemplo la investigación realizada por Shin et al. (2020), los cuales estudiaron la interferencia espectral de los metales pesados (Cu, Zn, As, Cd y Pb) en la determinación de propiedades del suelo, para esto emplearon firmas espectrales y algunas de las técnicas mencionadas en este apartado, por ejemplo: primera derivada y filtro de suavizado Savitsky-Golay, y por último construyeron correlogramas respecto a firmas de las librerías espectrales de la USGS y JPL, observando los cambios en las características de absorción cuando la presencia de metales pesados aumentaba.

3.3. Técnicas para localización y mapeo de elementos traza

En la actualidad existen diversas técnicas para detectar la presencia de elementos traza en el ambiente, unas presentan elevada robustez matemática, otras se

caracterizan por una operación algebraica entre bandas que aíslan estos elementos, como se presenta a continuación:

3.3.1. Análisis de Componentes Principales (ACP)

Esta técnica fue empleada originalmente en ciencias sociales y naturales, y se centra en resumir la información de un grupo amplio de variables en un conjunto más pequeño. Esta capacidad de síntesis ha sido la base para replicar en la teledetección, adicionalmente, proporciona una mejor distribución de los datos, lo que facilita la identificación de las distintas cubiertas (Chuvieco, 2010).

El proceso de funcionamiento de los ACP inicia con el cálculo de la media y la desviación estándar de cada una de las variables para la normalización de los datos, haciendo que todas las bandas espectrales tengan una media igual a cero y una desviación estándar igual a uno, garantizando de esta forma que los datos contribuyan igualmente en el análisis.

Posteriormente, se calcula la matriz de covarianza para analizar la relación entre las bandas espectrales, y la obtención de valores y vectores propios, los cuales indican la magnitud y dirección del estiramiento, respectivamente. Por último, se transforma los datos originales, proyectándolos en el espacio definido por las componentes principales (CP) (Made Simple, 2020). La Figura 3.7 resumen de manera gráfica lo realizado por el ACP.

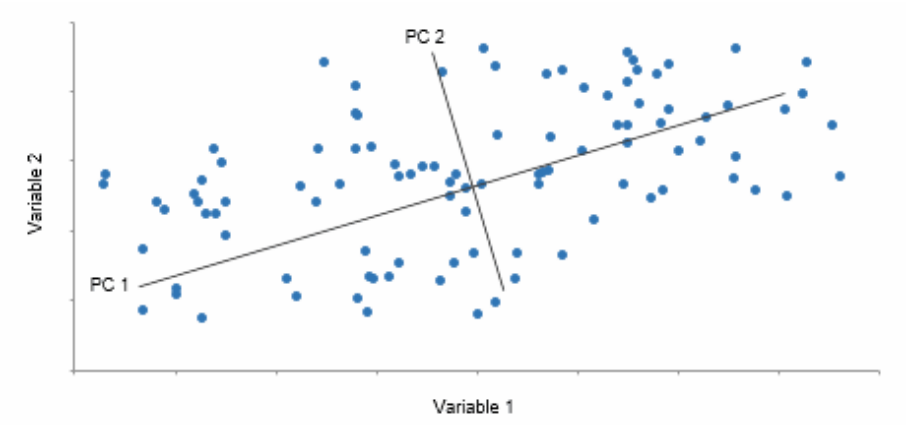


Figura 3.7: Aplicación de ACP en un conjunto de datos.
Fuente: Tomado de AVB (2021).

La técnica Crósta desarrollada en el año de 1989 y considerada como una técnica rápida, robusta y fiable, es una metodología basada en el ACP para el mapeo de

abundancia relativa de minerales usando imágenes Landsat. De manera detallada, Crósta & McM.Moore (1989) describen la metodología *Feature Oriented Principal Components Selection* (FPCS), la cual se basa en el análisis de las cargas de vectores propios del ACP, para decidir la CP que concentra información relacionada con las firmas espectrales teóricas. Cabe destacar que, el método empleaba 6 bandas espectrales, haciendo que el proceso de decisión de la CP sea largo y complejo.

Una variante a esta metodología fue presentada por Loughlin (1991), en la cual se reduce el número de canales de entrada de 6 a 4, evitando problemas de contraste espectrales y aumentando las posibilidades de definir una CP única para una clase mineral específica, dando mayor precisión y versatilidad a la técnica Crósta (Crósta, A. P. et al., 2003). Dichos canales pueden provenir de: caracterización de firmas espectrales, correlaciones con datos de análisis químicos, selección de variables mediante clasificadores, entre otros.

Al momento de obtener las CP se debe tener en cuenta que, la CP1 corresponde al brillo general de la escena, la CP2 describe el contraste entre bandas, y dentro de la CP3 y CP4 se puede esperar que contenga información relacionada al objeto de estudio, por ende, se deben examinar minuciosamente los pesos o cargas factoriales de la matriz de vectores propios, y sus signos (Loughlin, 1991).

Una limitante de esta técnica es la alta sensibilidad a la selección de bandas espectrales, una elección incorrecta puede llevar a una interpretación inadecuada de los resultados. Por ende, es clave emplear bandas que maximicen la diferenciación de los materiales o minerales de interés.

Rejas et al. (2014), mediante la presente técnica extrajo información mineralógica en los volcanes de Irazú y Turrialba, Costa Rica, por otro lado, Bezerra & Neivaldo (2011) emplearon la técnica Crósta para resaltar minerales con presencia de carbono, en el Municipio de la Independencia, Brasil. Adicionalmente, el estudio realizado por Pandey et al. (2014) emplearon ACP para la evaluación de la contaminación del aire por metales pesados.

Como se puede evidenciar, existe un número limitado de publicaciones que abordan la determinación de metales pesados mediante el uso de ACP. Esto confiere un enfoque innovador a la presente investigación, al integrar técnicas espectrométricas con datos multifuente para la detección y caracterización de metales pesados en el ambiente.

3.3.2. NDSI

Un índice espectral se forma a partir de combinaciones de varios valores espectrales, a los cuales se les aplica una operación matemática, con la finalidad de producir un valor único, el cual resalta diversas características de la superficie terrestre (Campbell & Wynne, 2011).

La forma más simple de un índice espectral es una razón entre dos valores digitales de bandas espectrales separadas, a lo que se denomina como NDSI. Dichas bandas pueden ser definidas mediante la aplicación del conocimiento del comportamiento espectrales de un determinado material. Una de las ventajas que presentan estos índices bidimensionales es la reducción o eliminación del ruido de fondo (Campbell & Wynne, 2011; Cao & Yang, 2023). La fórmula general para un NDSI es la siguiente (Ecuación 3.3):

Ecuación 3.3

$$NDSI = \frac{Banda1 - Banda2}{Banda1 + Banda2}$$

Arellano et al. (2015) manifiestan que los cambios que sufre la vegetación, pueden ser identificados mediante el uso de índices espectrales, los cuales pueden ser agrupados en:

- Índices de banda ancha: *simple ratio*, índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés), *green* NDVI, etc.
- Índices de banda estrecha: *red-edge* $NDVI_{705}$, *sum green*, OSAVI, etc.

Das et al. (2020); Wang et al. (2018) proponen y mencionan, respectivamente, diferentes NDSI diseñados para abordar temas de contaminación por metales pesados. Cada NDSI presenta sus fortalezas y puede incluir bandas de diferentes longitudes de onda dependiendo del nivel de concentración de los elementos traza.

Otros estudios, como el de Meza et al. (2020), caracterizaron el estrés hídrico sufrido en el cultivo de pepino dulce, para lo cual adquirieron las firmas espectrales de dos plantas (con riego localizado y sin riego) durante el lapso de diez días, y a partir de dichas firmas calcularon índices espectrales de vegetación orientados a resaltar los cambios fisiológicos que tienen lugar en la planta.

3.3.3. Clasificaciones digitales

La clasificación digital supone una alternativa a la interpretación visual donde se aprovecha la información contenida en distintas bandas espectrales para obtener

una nueva imagen, la cual agrupe, bajo cierto criterio de similitud, zonas o superficies semejantes (Sobrino et al., 2001).

Los algoritmos de aprendizaje más populares y de amplia adaptación al entorno del problema son los siguientes (Figura 3.8):

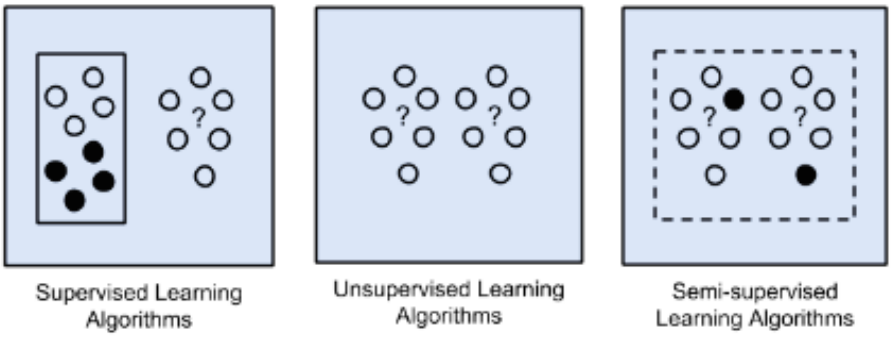


Figura 3.8: Algoritmos de aprendizaje.
Fuente: Tomado de Rokad (2019).

Los métodos supervisados parten de un cierto conocimiento de la zona de estudio, proporcionando al algoritmo muestras de entrenamiento, a partir de las cuales se caracterizan cada una de las clases y se prepara el modelo matemático, y posteriormente, se asignan los píxeles restantes a una determinada categoría. Los algoritmos más empleados son: *support vector machines*, *naive bayes*, *decision trees*, etc.

Por otro lado, se encuentran los algoritmos de aprendizaje no supervisado, en donde no se requiere conocimiento del área de estudio, por ende, la intervención humana se centra en la interpretación de los resultados. La imagen, en función del modelo matemático empleado, forma una serie de agrupaciones o conglomerados, los cuales poseen un comportamiento espectral homogéneo, definiendo de esta forma clases temáticas. Ejemplos de estos algoritmos son: *k-means*, *k-medians*, *isodata*.

En cambio, los algoritmos de aprendizaje semi supervisados procuran minimizar los inconvenientes que pueden suscitarse en los métodos anteriores, por un lado, la subjetividad del método supervisado, y, por otro lado, la validez del método no supervisado (Chuvieco, 2010; Rokad, 2019; Sobrino et al., 2001).

Uno de los clasificadores orientados al análisis de espectros, es el clasificador angular SAM, el cual se basa en el cálculo del ángulo espectral entre el vector

espectral de un píxel desconocido y el vector espectral de una firma de referencia, ya sea tomada de la propia imagen o de bibliotecas espectrales, en un espacio de *n* dimensiones, donde *n* es el número de bandas espectrales disponibles (Chuvieco, 2010). En la Figura 3.9 se presenta un esquema del clasificador para un caso sencillo de dos bandas espectrales.

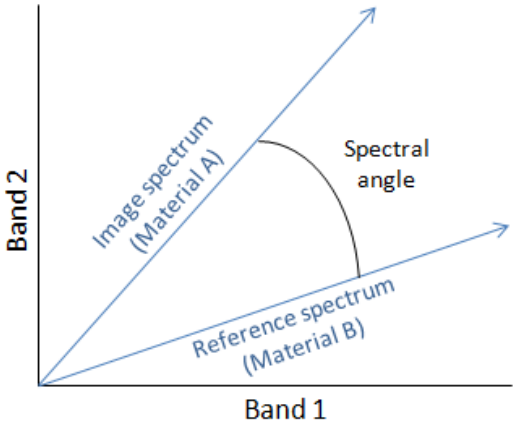


Figura 3.9: Ilustración del clasificador SAM en dos bandas espectrales.
Fuente: Tomado de NV5 (2024).

En varios estudios ha sido empleado de manera satisfactoria el clasificador SAM, por ejemplo: en la monitorización de áreas sedimentarias de residuos mineros en España (Pereira et al., 2023), en la validación de una red convolucional para detectar minería artesanal en Ghana (Gallwey et al., 2020), en el mapeo de diferentes tipos de abundancia de materiales en áreas semiurbanas (Rejas et al., 2007), entre otros.

3.3.4. Regresiones

Las regresiones son técnicas estadísticas que se utilizan para estimar valores de una variable de interés (dependiente) a partir de otra u otras variables asociadas con ella (independientes), mediante relaciones matemáticas. Sus aplicaciones dentro del ámbito de la teledetección son amplias, por ejemplo: estimación de valores de reflectividad, modelamiento de variables agroforestales, análisis de contaminación, etc. (Chuvieco, 2010).

Una de las alternativas para la detección de metales pesados, tanto en suelos como en vegetación, es la construcción de modelos de estimación a partir de variables explicativas relevantes. Cabe indicar que, dichos modelos se encuentran

condicionados por la concentración de los elementos traza y la localidad en la que se efectúa el estudio. Entre los más populares para dicho fin se encuentran: regresión lineal, regresión lineal múltiple, redes neuronales (ANN, por sus siglas en inglés) y mínimos cuadrados parciales (PLSR, por sus siglas en inglés), siendo este último uno de los algoritmos más empleados en la actualidad, el cual puede ser considerado como la suma de ACP y análisis de correlación, además, resuelve posibles problemas de colinealidad y es usado comúnmente para mapear la abundancia de metales pesados en suelo (Wang, F. et al., 2018).

Bajo este apartado existen múltiples estudios realizados, por ejemplo: Ren et al. (2010) generaron un modelo para determinación de Cu, Wang et al. (2010) en el caso de Pb, Kooistra et al. (2003); Liu et al. (2018) realizaron un proceso análogo para el Zn, entre otros.

4. EXPERIMENTACIÓN

"La vida debe ser una continua educación"

(Gustave Flaubert)

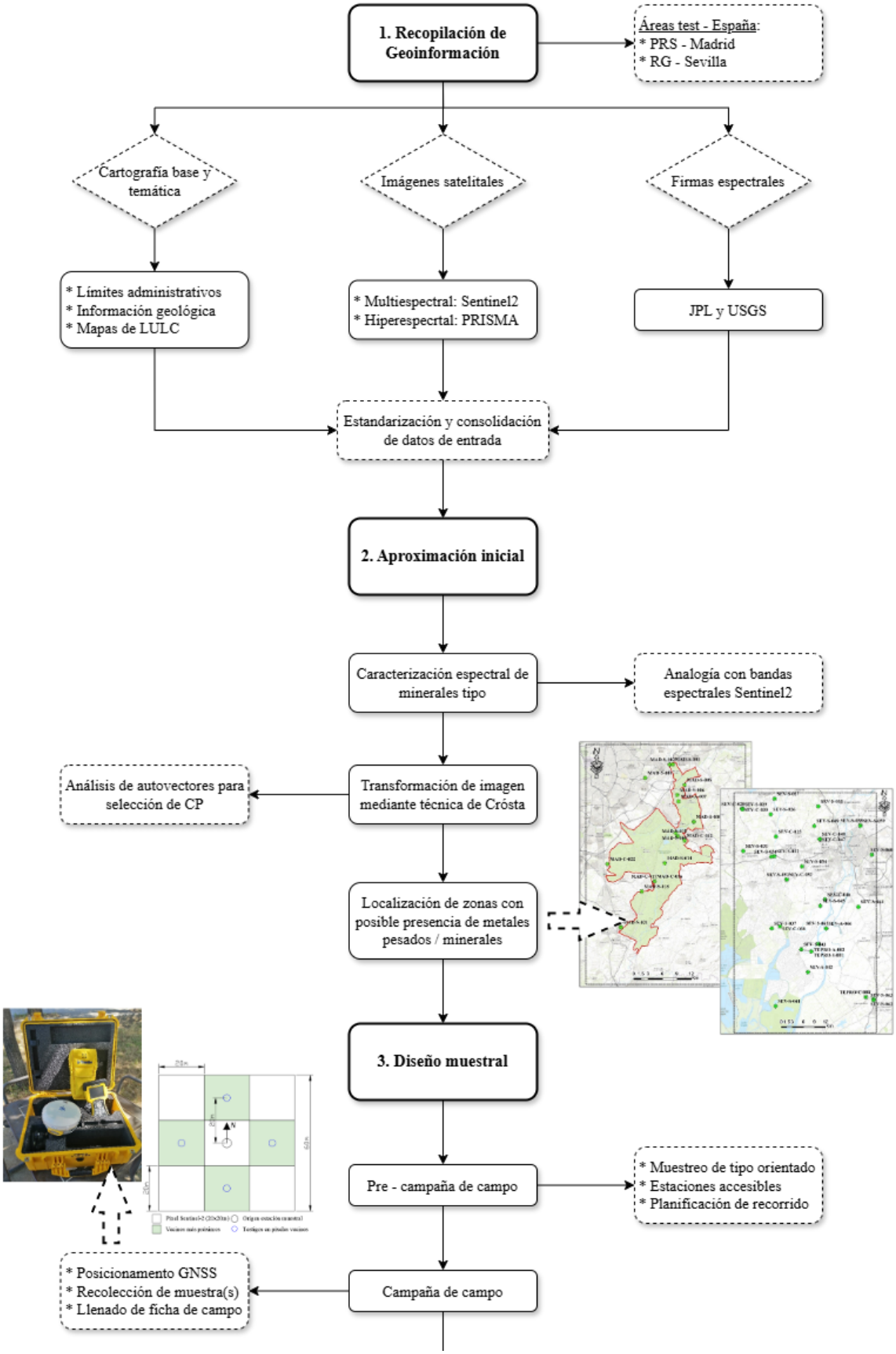
CONTENIDO:

4.1.	Introducción y flujograma de experimentación	47
4.2.	Áreas test	50
4.3.	Adquisición y procesamiento de geoinformación	53
4.4.	Aproximación inicial para detección de metales pesados	56
4.5.	Diseño, preparación y análisis muestral para detección de elementos traza	85
4.6.	Implementación de técnicas espectrométricas	110

4.1. Introducción y flujograma de experimentación

El proceso experimental fue diseñado para integrar imágenes satelitales con datos multifuente, combinando observaciones obtenidas de teledetección con mediciones de campo y análisis de laboratorio. En particular, se utilizaron imágenes de los sensores Sentinel-2 y PRISMA dentro de las áreas test seleccionadas. Estas imágenes fueron procesadas y complementadas con datos de campo y laboratorio de suelos y vegetación, para detectar y caracterizar la presencia de metales pesados en distintos entornos.

Dentro de la Figura 4.1 se presenta un flujograma que resume todo el proceso de experimentación, detallando cada etapa, desde la adquisición de datos hasta la evaluación de los resultados. Este esquema proporciona una visión clara y estructurada del procedimiento seguido, facilitando su comprensión y transferencia.


1. Recopilación de Geoinformación
Áreas test - España:
* PRS - Madrid
* RG - Sevilla
Cartografía base y temática
Imágenes satelitales
Firmas espectrales
* Límites administrativos
* Información geológica
* Mapas de LULC
* Multiespectral: Sentinel2
* Hiperespectral: PRISMA
JPL y USGS
Estandarización y consolidación de datos de entrada
2. Aproximación inicial
Caracterización espectral de minerales tipo
Analogía con bandas espectrales Sentinel2
Análisis de autovectores para selección de CP
Transformación de imagen mediante técnica de Crósta
Localización de zonas con posible presencia de metales pesados / minerales
3. Diseño muestral
Pre - campaña de campo
* Muestreo de tipo orientado
* Estaciones accesibles
* Planificación de recorrido
* Posicionamento GNSS
* Recolección de muestra(s)
* Llenado de ficha de campo
Campaña de campo

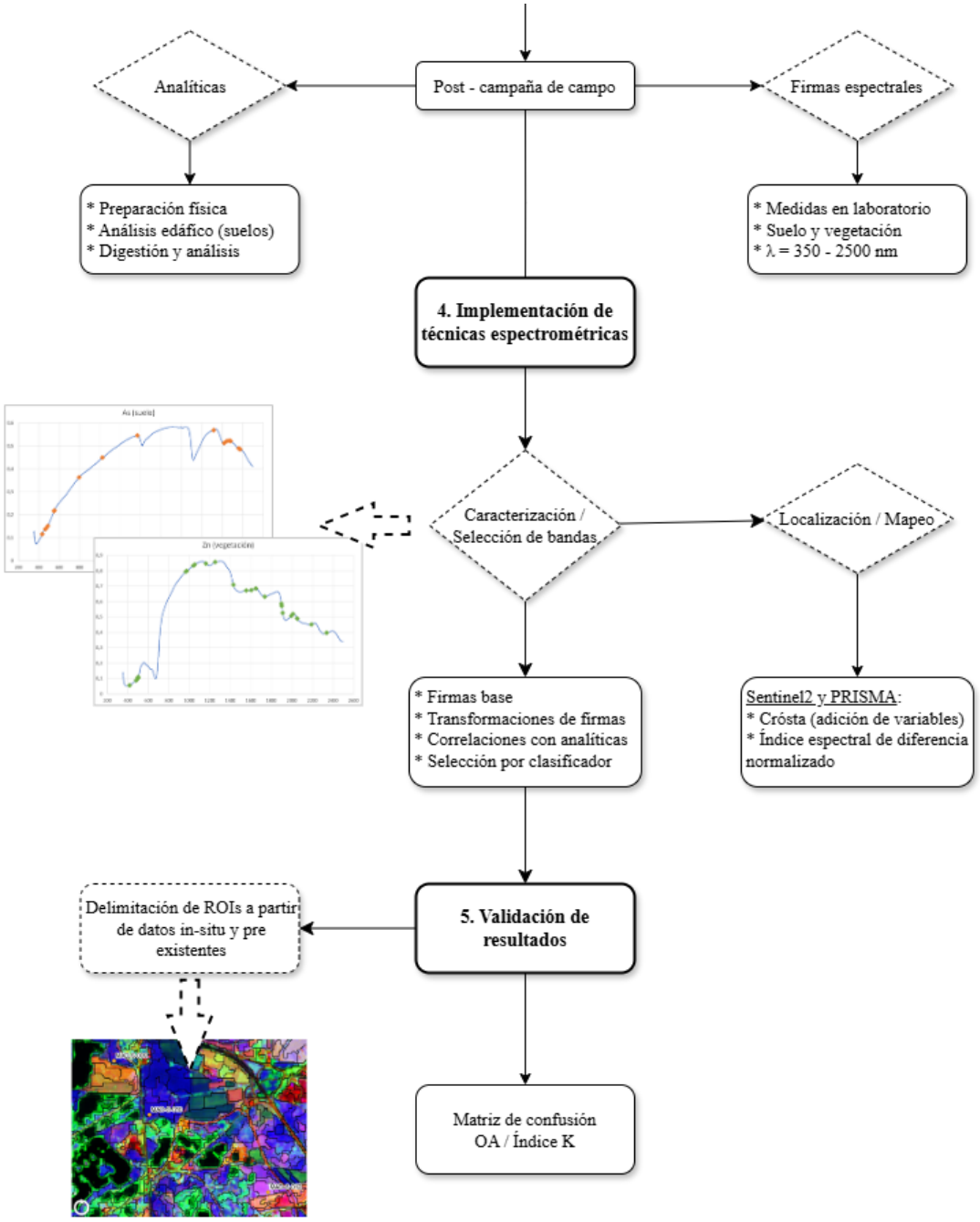


Figura 4.1: Flujograma de experimentación.

Pese a que el proceso número 5 corresponde al capítulo subsiguiente, es de importancia mencionarlo debido a que la validación permite conocer la fiabilidad de los resultados alcanzados mediante técnicas estadísticas, como se explica en el apartado respectivo.

4.2. Áreas test

Las áreas test ubicadas en España, fueron seleccionadas en función de: accesibilidad, posibilidad para recoger muestras (suelos y vegetación) y adquirir datos (imágenes satelitales, espectrorradiómetro, etc.), disponibilidad de geoinformación, y que exista la presencia de metales pesados en función de bibliografía o publicaciones pre existentes.

4.2.1. Ubicación geográfica

a. Parque Regional del Sureste de Madrid (PRS)

Se seleccionó el PRS debido a la proximidad con respecto al centro de estudios de la UPM, a la existencia de un elevado número de canteras dentro del sector, y por los reportes en prensa y foros, en donde resaltan la presencia de vertidos de residuos con alto contenido de metales pesados (Castillejo, 2019; Fonseca, 2016).

El PRS posee una superficie de 314,72 km^2, extendiéndose de norte a sur, desde San Fernando de Henares hasta Ciempozuelos. A pesar de esto, se seleccionó una superficie de 1.671,58 km^2, abarcando un mayor número de canteras y especies vegetativas a sus alrededores (Figura 4.2).

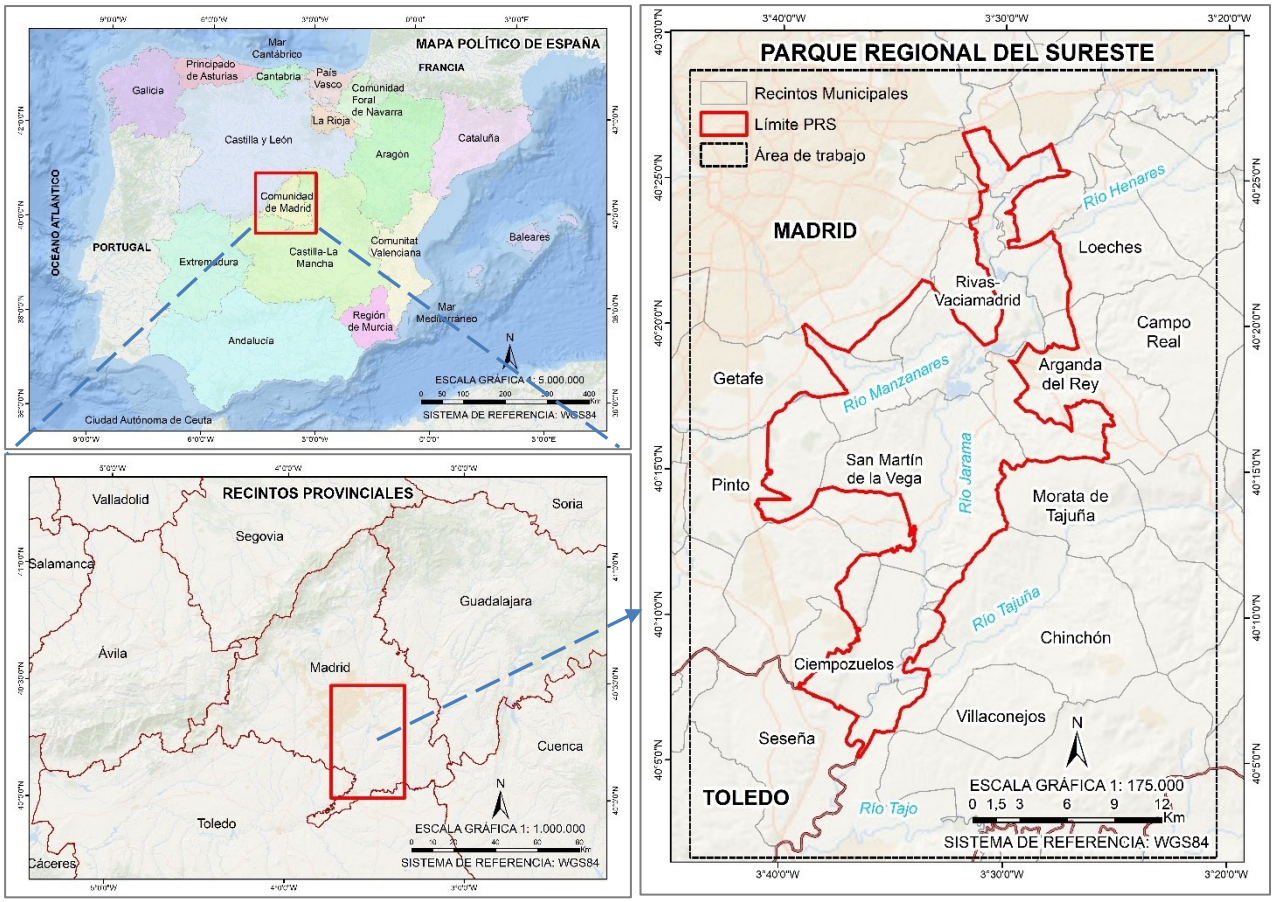


Figura 4.2: Ubicación del PRS.

Fuente cartográfica: CM (2019); ESRI (2020); IGN (2019).

b. Valle del río Guadalquivir, Andalucía (RG)

La presente área fue seleccionada y definida conjuntamente con la empresa TEPRO, debido a la presencia de As y Cd, localizados principalmente en cultivos de arroz. En función de esto, se seleccionó una superficie de 2.529,31 km² que abarca desde los poblados de Aznalcóllar y Gerena al norte hasta el Parque Nacional Doñana al sur (Figura 4.3).

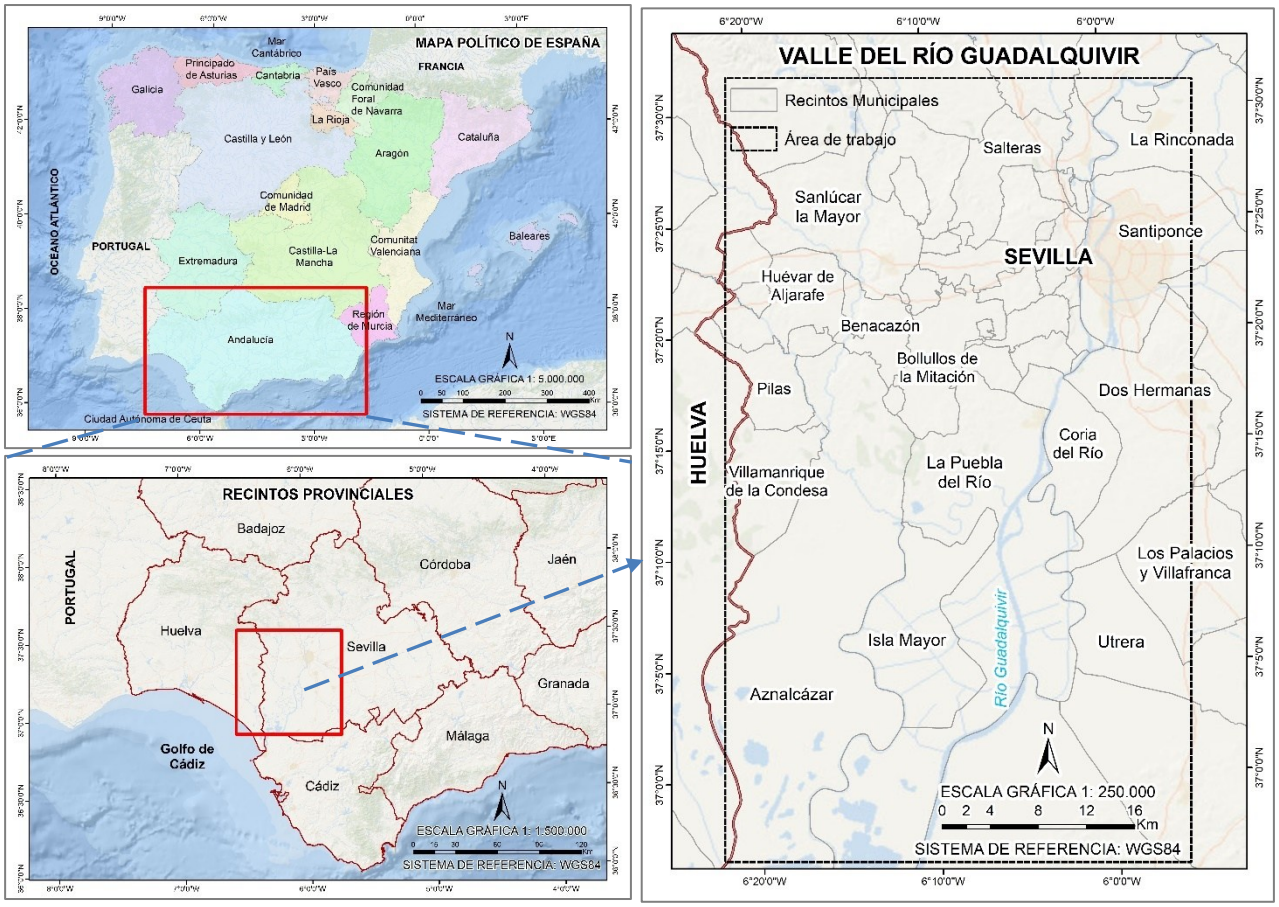


Figura 4.3: Ubicación del RG.

Fuente cartográfica: ESRI (2020); IGN (2019); Junta de Andalucía (2019).

4.2.2. Descripción físico ambiental

a. PRS

El PRS presenta dos unidades ambientales, la primera coligada a los relieves colinados terciarios, donde las zonas con alturas menores a 650 msnm presentan litologías asociadas a yesos, margas, sepiolita y arenas micáceas, y las zonas con alturas superiores a 650 msnm presentan calizas dolomíticas y sílex, y la segunda unidad hace referencia a los valles y terrazas aluviales, compuestos principalmente de sedimentos detríticos (gravas, arenas y arcillas) (IGME, 1998).

En cuanto al uso y cobertura del suelo predominan los cultivos herbáceos sobre los valles o terrazas aluviales, sin embargo, al oeste del río Jarama se los encuentra asociados con pastizales y matorrales, y en los relieves colinados terciarios ubicados al sur del río Tajuña y al este de Arganda del Rey se asocian con cultivos

como olivares y viñedos. A lo largo de toda la zona de estudio es característico encontrar áreas de extracción (canteras) y vertederos (IGN, 2011).

En el aspecto fluvial existe la presencia de los ríos Manzanares (atraviesa la ciudad de Madrid de noroeste a sureste), Henares, Tajuña y Tajo, los cuales desembocan en el río Jarama (≈ 30 m^3/s), siendo este último el más representativo, ya que recorre longitudinalmente el PRS.

b. RG

Dentro del RG existen dos unidades ambientales, la primera ubicada al norte, cercano a los poblados de Aznalcóllar y Gerena, en donde predominan los relieves colinados del terciario, compuestos de calizas conglomeráticas y margas de diferente coloración. Por otro lado, dentro de la misma unidad ambiental, en el centro de la zona de estudio, existe una composición más conglomerática, además de, material limo arenoso calcáreo y gravas, asociadas a posibles glacis de esparcimiento, con presencia esporádica de margas.

La segunda unidad ambiental se ubica al sur, denominada como marismas del Guadalquivir en donde se presentan terrazas de diferentes niveles a lo largo de los ríos Guadalquivir y Guadiamar, compuestas mayormente por arcillas y limos a los alrededores de los drenajes, y arenas junto al Parque Nacional Doñana (IGME, 1998).

En cuanto al uso y cobertura vegetal, la presencia de cultivos herbáceos, sobre todo arroz, es característico al centro y sur de la zona de estudio, a los alrededores del poblado de Isla Mayor, por otro lado, al norte del área seleccionada, predominan olivares (intensivo y tradicional) y almendros (IGN, 2011).

En cuanto al aspecto fluvial, uno de los ríos más importantes del área es el Guadalquivir, el cual atraviesa de noreste a suroeste, y es aprovechado para regar diferentes parcelas de cultivos. Por otro lado, se tiene el río Guadiamar, el cual recorre de norte a sur el área de estudio, atravesando el denominado Corredor Verde y el Parque Nacional de Doñana, el cual se encuentra ubicado al suroeste del RG.

4.3. Adquisición y procesamiento de geoinformación

Se empleó geoinformación de acceso libre, proveniente de organismos oficiales, la cual fue estandarizada bajo un mismo sistema de referencia, para el caso del PRS se utilizó WGS84 UTM Z30N, y para RG, WGS84 UTM Z29N.

4.3.1. Datos geoespaciales

a. Cartografía base y temática

La geoinformación utilizada dentro de la fase de experimentación se menciona en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Cartografía base y temática.

Organismo	Cobertura	Descripción
Instituto Geográfico Nacional, España (IGN)	Sistema de Información sobre Ocupación del Suelo de España (SIOSE)	Año: 2011 Formato: *.shp Escala: 25k
	Límites administrativos del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (MITMA)	Año: 2019 (actualización) Formato: *.shp Escala: 25k
	Modelo Digital del Terreno (MDT)	Año: 2009 Formato: *.asc Resolución espacial: 5 m
	Base Topográfica Nacional (BTN)	Año: 2017 Formato: *.shp Escala: 25k
	Redes de estaciones permanentes GNSS (Sistema Global de Navegación por Satélite)	Año: 2013 Formato: *.kmz
	Sistema de coordenadas original: EPSG:4258-ETRS1989 Fuente: IGN (2019)	
Instituto Geológico y Minero de España (IGME)	Hojas geológicas: • PRS: Madrid, Alcalá de Henares, Getafe, Arganda, Aranjuez y Chinchón • RG: Sanlucar La Mayor, Sevilla, Almonte, Dos Hermanas, El Rocío y Los Palacios y Villafranca	Años: 1972 al 2003 Formato: *.jpg Escala: 50k
	Mapas Metalogenéticos (serie antigua): Madrid, Sevilla y Ayamonte-Huelva	Años: 1973 y 1974 Formato: *.jpg Escala: 200k
	Mapas de Minerales y Rocas Industriales de Madrid	Año: 1988 Formato: *.jpg Escala: 400k
	Sistema de coordenadas original: EPSG:4230-EuropeanDatum50 Fuente: IGME (1998)	
Comunidad de Madrid (CM) – Datos Abiertos	Límites del PRS	Año: 2019 (actualización) Formato: *.shp
	Red viaria (líneas)	Año: 2019 (actualización) Formato: *.shp Escala: 10k
	Litología de la Comunidad de Madrid (CM)	Año: 2019 (actualización) Formato: *.shp Escala: 50k
	Suelos (*Soil Taxonomy*) de la CM	Año: 2019 (actualización) Formato: *.shp Escala: 50k
	Sistema de coordenadas original: EPSG:25830-ETRS89 UTM Z30N Fuente: CM (2019)	

Organismo	Cobertura	Descripción
CM – Instituto de Estadística	Distritos y Barrios de Madrid	Año: 2019 Formato: *.shp
	Sistema de coordenadas original: EPSG:25830-ETRS89 UTM Z30N Fuente: Instituto de Estadística de la CM (2023)	
Junta de Andalucía – Red de Información Ambiental de Andalucía (REDIAM)	Límites de los Espacios Naturales Protegidos de Andalucía (EENNPP)	Año: 2019 (actualización) Formato: *.shp
	Elementos traza en los suelos de Andalucía	Año: 2004 Formato: *.shp Escala: 400k
	Mapa de unidades litológicas de Andalucía	Año: 1998 Formato: *.shp Escala: 400k
	Mapa de suelos Andalucía (FAO y USDA - *United States Department of Agriculture*)	Año: 2005 Formato: *.shp Escala: 400k
	Sistema de coordenadas original: EPSG:25830-ETRS89 UTM Z30N Fuente: Junta de Andalucía (2019)	
Junta de Andalucía - Instituto de Estadística y Cartografía	Secciones censales de Andalucía	Año: 2019 Formato: *.shp
	Sistema de coordenadas original: EPSG:25830-ETRS89 UTM Z30N Fuente: Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía (2024)	

b. Imágenes satelitales

Las imágenes satelitales utilizadas son detalladas dentro de la Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Imágenes satelitales.

Organismo	Cobertura	Descripción
Agencia Espacial Europea (ESA, por sus siglas en inglés)	Imágenes Sentinel-2: PRS	Fechas: 03/01/2021 (S2B) y 27/06/2021 (S2A)
	Imágenes Sentinel-2: RG	Fechas: 16/05/2021 (S2A) y 30/06/2021 (S2A)
	Formato: *.jp2 Nivel de procesamiento: L2A [ρ debajo de la atmósfera (BOA, por sus siglas en inglés)] Sistema de coordenadas: EPSG:32630-WGS84 UTM Z30N Fuente: ESA (2024a)	
Agencia Espacial Italiana (ASI, por sus siglas en italiano)	Imagen PRISMA: RG	Fecha: 07/07/2021
	Formato: *.he5 Nivel de procesamiento: L2D (ρ BOA) Sistema de coordenadas: EPSG:32630-WGS84 UTM Z30N Fuente: ASI (2024)	

Como se puede evidenciar, se obtuvieron imágenes Sentinel-2 de diferentes fechas, debido a que, las más antiguas fueron empleadas en el subproceso de aproximación inicial de metales pesados, y las subsiguientes se emplearon en la localización

geoespacial de elementos traza. En cuanto a la imagen PRISMA se utilizó aquella imagen lo más cercano posible a las fechas de la campaña de campo, cabe indicar que, para obtener esta imagen fue necesario firmar una licencia de prestación de productos.

4.3.2. Datos espectrales

En cuanto a los datos o bibliotecas espectrales empleadas, se describen dentro de la Tabla 4.3:

Tabla 4.3: Bibliotecas espectrales.

Organismo	Características	Fuente
JPL	Tipo: Firmas espectrales Formato: *.ascii Rango espectral: 0,4 a 2,5 µm	JPL (2018)
USGS		USGS (2017)

4.4. Aproximación inicial para detección de metales pesados

Se realizó una primera aproximación mediante la técnica de Crósta para localizar zonas con posible contaminación de elementos traza. A continuación, se detallan cada uno de las fases inmersas en la misma.

4.4.1. Caracterización espectral

El presente apartado radica en la selección de longitudes de onda absortivas y reflectivas con mayor representatividad, a partir de los minerales característicos del PRS, a modo de ensayo, y minerales con alta presencia de metales pesados, para lo cual se empleó el banco de firmas espectrales del JPL y de la USGS.

Posteriormente, se realizó una analogía entre las bandas absortivas y reflectivas seleccionadas con las bandas correspondientes al Sentinel-2 (Figura 4.4), permitiendo de esta forma definir aquellas bandas que serán empleadas en la técnica Crósta.

Band Number	Band Description	Wavelength Range (nm)	Resolution (m)
B1	Coastal aerosol	433–453	60
B2	Blue	458–523	10
B3	Green	543–578	10
B4	Red	650–680	10
B5	Red-edge 1	698–713	20
B6	Red-edge 2	733–748	20
B7	Red-edge	773–793	20
B8	Near infrared (NIR)	785–900	10
B8A	Near infrared narrow (NIRn)	855–875	20
B9	Water vapour	935–955	60
B10	Shortwave infrared/Cirrus	1360–1390	60
B11	Shortwave infrared 1 (SWIR1)	1565–1655	20
B12	Shortwave infrared 2 (SWIR2)	2100–2280	20

Figura 4.4: Características espectrales de Sentinel-2.

Fuente: Tomado de ESA (2024c).

Cabe mencionar que, no se emplea la banda 10 de Sentinel-2 debido a que no contiene información de la superficie de la tierra, esto se puede visualizar en la Figura 4.5, en donde se evidencian las funciones de respuesta espectral y la transmisión debido a la absorción de vapor de agua para atmósfera invernal (azul claro) y tropical (azul oscuro, mayor contenido).

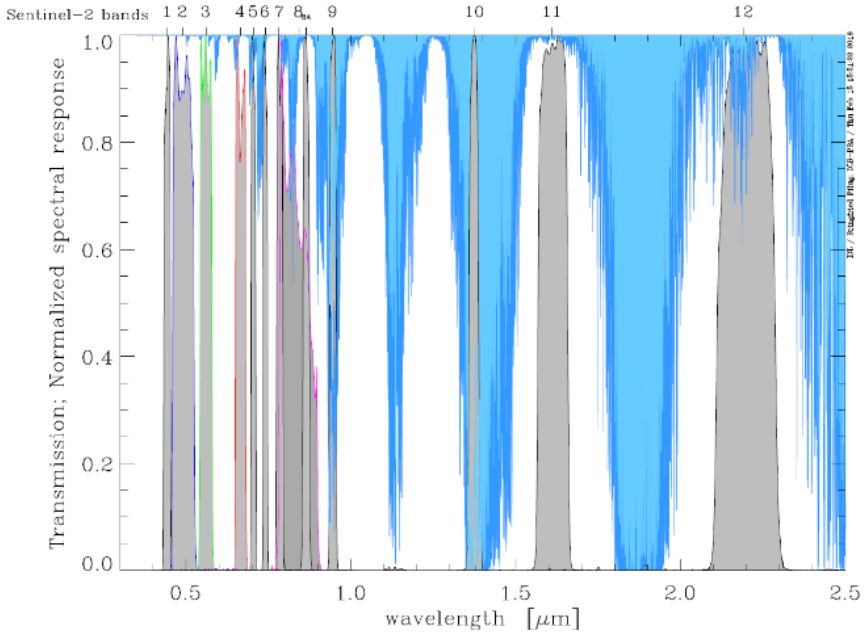


Figura 4.5: Respuesta espectral y transmisión debido a la absorción de vapor de agua para el caso de Sentinel-2.

Fuente: Tomado de ESA (2024c).

a. Minerales característicos en el PRS

Como se mencionó anteriormente, este apartado fue desarrollado a modo de ensayo, con la finalidad de adquirir el adiestramiento necesario para el manejo de las técnicas espectrométricas. En función de esto, para la identificación de aquellos minerales con mayor presencia dentro del PRS (Tabla 4.4) se empleó como información de partida los mapas geológicos, metalogenéticos y de minerales elaborados por el IGME (1998), además del material bibliográfico Gil (2016); Maldonado (2017); Sastre (2007).

Tabla 4.4: Bandas absortivas y reflectivas de minerales con mayor presencia en el PRS.

Mineral / (Roca)	Grupo	Fórmula química	Firma espectral / (Fuente)	Absortividad (λ µm)	Reflectividad (λ µm)
Montmorillonita / (Bentonita)	Silicato	(Na,Ca)0.33(Al,Mg) 2Si4O10(OH)2*nH2O	MONTMORI-LLONITE CAL PS-2B_jpl1 / (JPL)	0,560 0,960 1,152 1,412* 1,904* 2,208	0,772 1,072 1,228* 1,672* 2,136 2,260
Sepiolita	Silicato	Mg4Si6O15 (OH)2*H2O	SEPIOLITE PS-5A_jpl1 / (JPL)	0,558 1,152 1,384 1,412* 1,908* 2,308	0,693 1,216 1,392 1,668* 2,124* 2,332
Calcita / (Caliza)	Carbonato	CaCO3	calcite2.spc Calcite HS48.3B / (USGS)	0,4553 1,3935 1,5705 1,8750 1,9950* 2,1650 2,3350* 2,5280	0,8065 1,5340 1,7888 1,9050 2,0550* 2,1850 2,4000* ---
Dolomita / (Caliza dolomítica)	Carbonato	CaMg(CO3)2	dolomit1.spc Dolomite HS102.3B / (USGS)	0,4653 0,6882 1,8550 1,9750 2,3150* 2,4960*	0,5913 0,7340 1,8850 2,1650* 2,3650* ---
Yeso	Sulfato	CaSO4·2H2O	GYPSUM SO-2B_jpl2 / (JPL)	--- 0,800 0,996 1,204 1,444* 1,744 1,940*	0,561 0,928 1,064 1,284* 1,668 1,828* 2,052

Mineral / (Roca)	Grupo	Fórmula química	Firma espectral / (Fuente)	Absortividad (λ µm)	Reflectividad (λ µm)
				2,212	2,308

*Bandas absortivas y reflectivas con mayor contraste espectral

Es importante mencionar que, una de las rocas con mayor presencia dentro del área del PRS es la bentonita, la cual se encuentra compuesta en un 92% por montmorillonita perteneciente a la familia de los filosilicatos, y dentro de ellos pertenece a las denominadas arcillas. De igual forma, la sepiolita pertenece a la familia de los filosilicatos con propiedades absorbentes y reológicas singulares. Por otro lado, la calcita y la dolomita son minerales predominantes que se encuentran en las calizas.

Las firmas espectrales de los minerales mencionados anteriormente fueron obtenidas de las librerías JPL y de la USGS e incorporadas en la Figura 4.6, en donde las longitudes de onda del espectro se encuentran representadas en el eje X ($0{,}4 < \lambda < 2{,}5$ µm), y los valores de reflectividad en el eje Y.

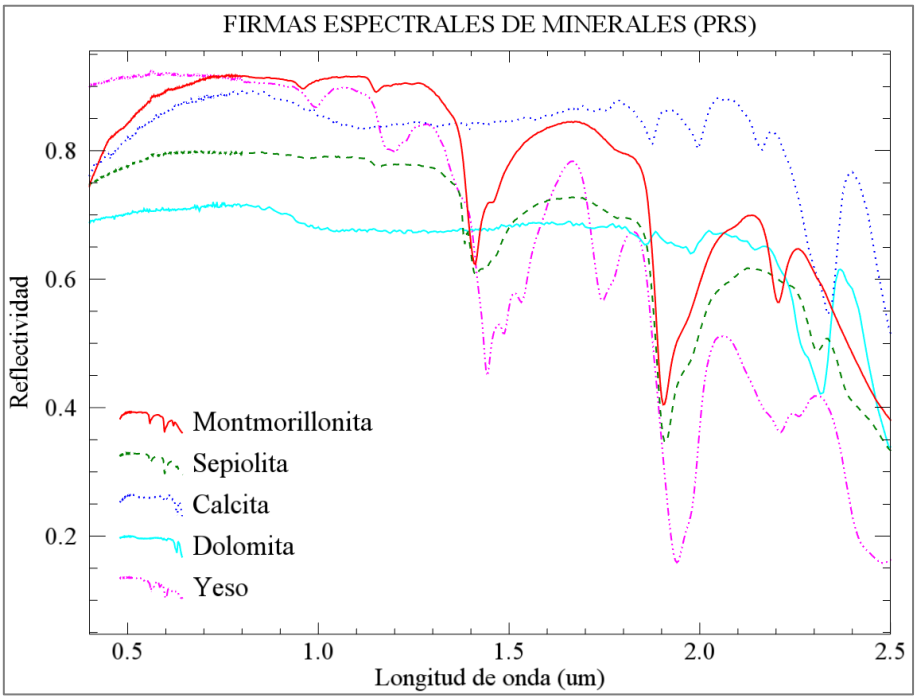


Figura 4.6: Firmas espectrales de minerales característicos del PRS.
Fuente: Adaptado de JPL (2018); USGS (2017).

Cabe mencionar que, no todas las bandas absortivas y reflectivas seleccionadas por cada mineral presentan analogía con las bandas que posee el Sentinel-2, por ende, las bandas empleadas por cada mineral fueron las siguientes (Tabla 4.5):

Tabla 4.5: Bandas análogas Sentinel-2.

Mineral	Absortividad		Reflectividad		Bandas para ACP
	λ (µm)	Banda Sentinel-2	λ (µm)	Banda Sentinel-2	
Montmorillonita	0,560 0,960 2,208	B3 B9 B12	0,772 1,672 2,136 2,260	B7 B11* B12 B12	B7 B9 B11** B12**
Sepiolita	0,558 2,308	B3 B12*	0,693 1,668 2,124	B5 B11* B12	B3 B5 B11** B12**
Calcita	0,4533 1,5705 2,1650	B2 B11 B12	0,8065 2,1850	B8 B12	B2 B8 B11** B12**
Dolomita	0,4653 0,6882	B2 B4	0,7340 2,1650	B6 B12	B2 B4** B6 B12**
Yeso	0,800 2,212	B8 B12	0,561 0,928 1,668	B3 B9* B11*	B3 B8 B11** B12**

*Longitud de onda levemente desplazada del rango espectral de la banda análoga;
**Bandas con mayor contraste espectral

b. Minerales con presencia de metales pesados

Similar procedimiento fue aplicado sobre aquellos minerales que contienen los siguientes metales pesados: As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb y Zn, ya que como se mencionó anteriormente, son considerados por Galán & Romero (2008) como muy tóxicos, fácilmente disponibles y fácilmente movilizados por la actividad humana.

Para este proceso se estudió la importancia geológica-económica con la finalidad de seleccionar minerales que contengan mencionados elementos traza (Tabla 4.6) y que presenten rasgos distintivos de absortividad y reflectividad. En función de esto, el material bibliográfico empleado fue: Barthelmy (2012); Lenntech (2024); Marshall & Fairbridge (1999).

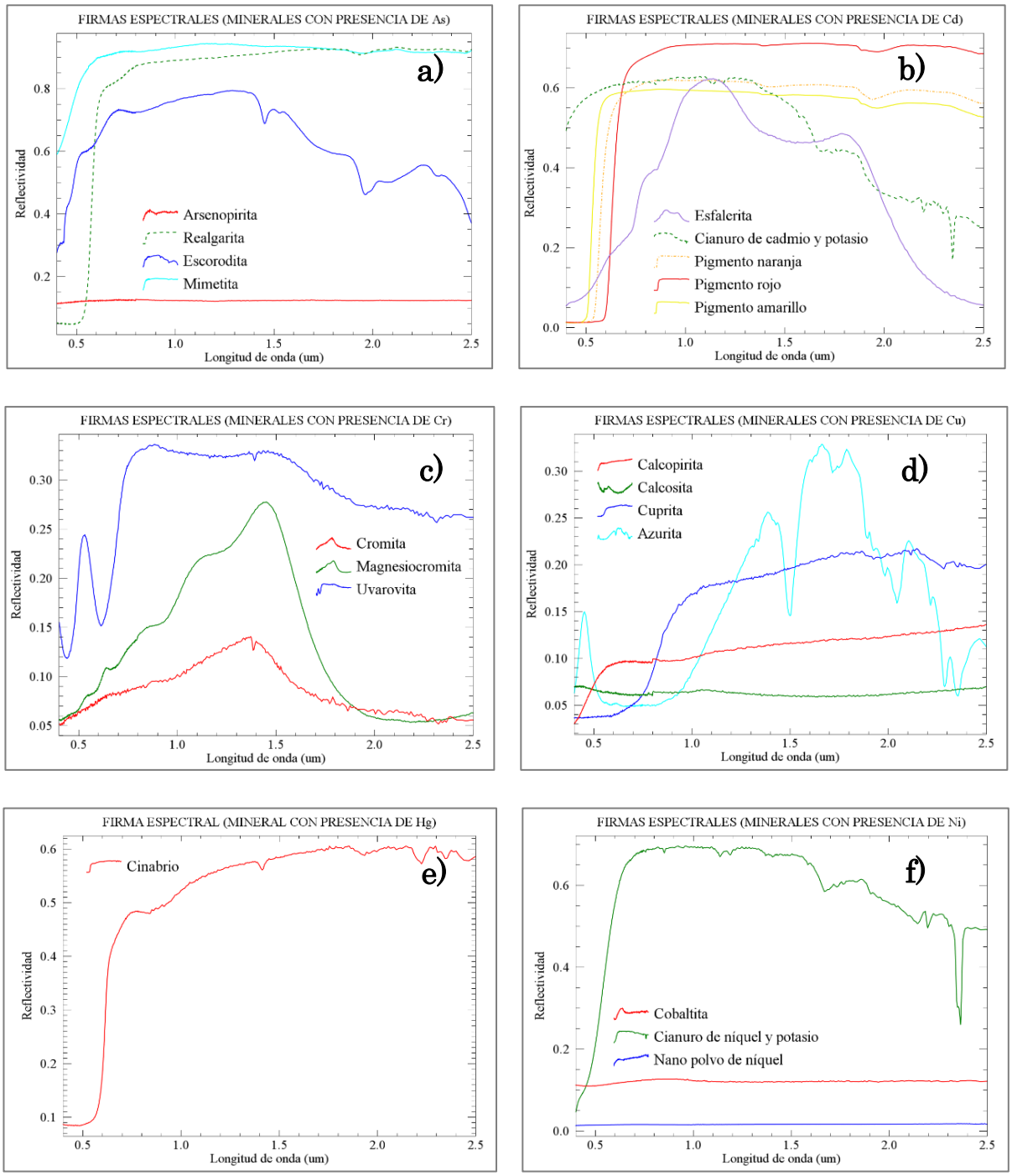
Tabla 4.6: Minerales con importancia geológica-económica y con presencia de metales.

Metal	Mineral	Grupo	Fórmula química	Cantidad de metal	Firma espectral / (Fuente)
As	Arsenopirita	Sulfuro	FeAsS	46%	ARSENOPYRITE S-5A_jpl1 / (JPL)
	Realgarita	Sulfuro	As4S4	70%	REALGAR S-3A_jpl1 / (JPL)
	Escorodita*	Fosfato	Fe(+3)As04·2H20	33%	SCORODITE A-2A_jpl1 / (JPL)
	Mimetita	Fosfato	Pb5(AsO4)3Cl	15%	MIMETITE A-1A_jpl1 / (JPL)
Cd	Esfalerita	Sulfuro	ZnS	1000ppm	sphaler4.spc Sphalerite S26-34 / (USGS)
	Cianuro de cadmio y potasio: reactivo químico*	---	Ca(CN)2	---	Cyanide_Cadmium_ Potassium / (USGS)
	Pigmentos de pintura: naranja, rojo y amarillo	---	CdS1-xSex	---	Cadmium_orange Cadmium_red Cadmium_yellow / (USGS)
Cr	Cromita	Óxido	Fe(+2)Cr2O4	47%	chromite.spc Chromite HS281.3B / (USGS)
	Magnesiocromita*	Óxido	MgCr2O4	54%	MAGNESIOCHROMITE O-8A_jpl1 / (JPL)
	Uvarovita	Silicato	Ca3Cr(+3)2(SiO4)3	21%	uvarovit.spc Uvarovite NMNH106661 / (USGS)
Cu	Calcopirita	Sulfuro	CuFeS2	35%	CHALCOPYRITE S-4A_jpl3 / (JPL)
	Calcosita	Sulfuro	Cu2S	80%	CHALCOCITE S-8A_jpl3 / (JPL)
	Cuprita	Óxido	Cu2O	89%	cuprite.spc Cuprite HS127.3B / (USGS)
	Azurita*	Carbonato	Cu3(0H)2(C03)2	55%	azurite.spc Azurite WS316 / (USGS)
Hg	Cinabrio*	Sulfuro	HgS	86%	cinnabar.spc Cinnabar HS133.3B / (USGS)
Ni	Cobaltita	Sulfuro	CoAsS	<10%	cobaltit.spc Cobaltite HS264.3B / (USGS)
	Cianuro de níquel y potasio: reactivo químico*	---	K2Ni(CN)4·H2O	---	Cyanide_Nickel_ Potassium / (USGS)
	Nano polvo de níquel	---	Ni	---	Nickel_Powder / (USGS)
Pb	Galena	Sulfuro	PbS	87%	GALENA S-7A_jpl3 / (JPL)
	Cerusita*	Carbonato	PbCO3	78%	CERUSSITE C-10A_jpl3 / (JPL)
	Anglesita	Sulfato	PbSO4	68%	ANGLESITE SO-10A_jpl3 / (JPL)
Zn	Esfalerita	Sulfuro	ZnS	64%	sphaler4.spc Sphalerite S26-34 / (USGS)
	Zincita	Óxido	ZnO	80%	ZINCITE SYNTHETIC O-13A_jpl3 / (JPL)
	Smithsonita	Carbonato	ZnCO3	52%	SMITHSONITE C-11A_jpl3 / (JPL)
	Hemimorfita*	Silicato	Zn4Si2O7(OH)2·H2O	54%	HEMIMORPHITE SS-2A_jpl3 / (JPL)

*Mineral seleccionado en función de los rasgos distintivos de la firma espectral y/o al contenido puro del elemento traza

Dentro de la Tabla 4.6 se puede evidenciar que, para el caso del As, se seleccionó la Escorodita, a pesar de que la Realgarita contenga mayor cantidad de este metal, sin embargo, su firma espectral presenta una alta complejidad para extraer bandas absortivas y reflectivas. Para el caso del Cd y Ni, no se cuenta con firmas provenientes de espectros puros. En cuanto al Cr, Cu, Pb y Zn, son casos similares al As, y con respecto al Hg, presenta tan solo un mineral asociado a dicho elemento.

A continuación, se presentan las firmas espectrales de los minerales con presencia de metales pesados, obtenidas de las librerías JPL y USGS (Figura 4.7):



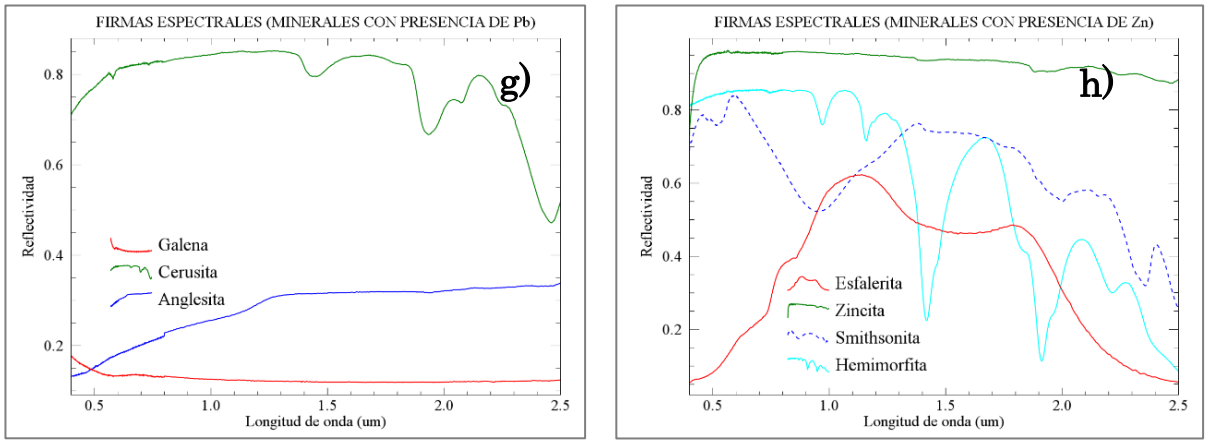


Figura 4.7: Firmas espectrales de minerales con presencia de metales pesados: a) As; b) Cd; c) Cr; d) Cu; e) Hg; f) Ni; g) Pb; h) Zn.

Fuente: Adaptado de JPL (2018); USGS (2017).

Para cada uno de los minerales seleccionados se identificaron bandas absortivas y reflectivas a partir de las firmas espectrales, y su respectiva analogía con las bandas del sensor Sentinel-2 (Tabla 4.7).

Tabla 4.7: Bandas análogas absortivas y reflectivas con bandas de Sentinel-2.

Mineral / Metal	Absortividad		Reflectividad		Bandas para ACP
	λ (µm)	Banda Sentinel-2	λ (µm)	Banda Sentinel-2	
Escorodita / As	0,434	B1	0,712	B5	
	0,797	B8	1,288*	---	B1**
	1,452*	---	1,500*	---	B5**
	1,964*	---	2,032	---	B8
	2,076	---	2,244	B12	B12
	2,336	---	---	---	
Cianuro de cadmio y potasio / Cd	0,6792	B4	0,7655	B7***	
	0,8510	B8	1,0935	---	B4**
	1,1385	---	1,2485*	---	B7
	1,6920*	---	1,7880	---	B8
	2,1950	B12	2,2450*	B12	B12**
	2,3450*	---	2,3650	---	
Magnesiocromita / Cr	0,514	B2	0,545	B3	B3**
	0,667	B4	0,860	B8A	B4**
	0,952	B9	1,140*	---	B8A
	1,264*	---	1,452*	---	B12
	2,184*	B12	---	---	
Azurita / Cu	---	---	0,4533	B1	B4

Mineral / Metal	Absortividad		Reflectividad		Bandas para ACP
	λ (µm)	Banda Sentinel-2	λ (µm)	Banda Sentinel-2	
	0,5433	B3	0,6043	---	B6
	0,6657	B4	0,7480	B6	B11**
	0,8430	B8	1,3885	---	B12**
	1,5035*	B11***	1,6615*	B11	
	1,7160*	---	1,7880*	---	
	2,0450	---	2,1050	B12	
	2,2850	---	---	---	
Cinabrio / Hg	0,5613	B3	0,7810	B7	
	0,8430	B8A***	1,3735	---	B7**
	1,4135*	---	1,6405	B11	B8A**
	1,7320	---	1,7560*	---	B11
	1,9350	---	2,0550	---	B12
	2,2250*	B12	2,2950*	---	
Cianuro de níquel y potasio / Ni	---	---	0,7380	B6	
	0,7565	---	0,8220	B8	
	0,8510	B8A***	0,9570	B9***	B8A
	1,1335	---	1,2485	---	B9
	1,4035	---	1,5035*	---	B11**
	1,6685*	B11***	1,8550	---	B12**
	2,1450	B12	2,1850*	B12	
	2,3650*	---	2,4400	---	
Cerusita / Pb	---	---	0,563	B3	
	0,580	B3***	0,713	B5	
	0,734	B6	0,786	B7	B3**
	0,804	B8	1,136	---	B5**
	1,188	---	1,268*	---	B6
	1,452*	---	1,684*	---	B12
	1,932*	---	2,048	---	
	2,072	---	2,148	B12	
	2,460	---	---	---	
Hemimorfita / Zn	---	---	0,560	B3	
	0,581	---	0,674	B4	
	0,742	B6	0,800	B7***	B4
	0,844	B8	0,872	B8A	B6
	0,972	---	1,068	---	B11**
	1,160	---	1,240	---	B12**
	1,420*	---	1,668*	B11***	
	1,912*	---	2,084*	---	
	2,216	B12	2,276	B12	

*Bandas absortivas y reflectivas con mayor contraste espectral;
**Bandas Sentinel-2 con mayor contraste espectral;
***Longitud de onda levemente desplazada del rango espectral de la banda análoga

Para culminar este ítem se creó una librería espectral (*.txt) con cada uno de los minerales mencionados bajo este apartado, empleando un rango espectral de 0,4 < λ < 2.5 µm, con intervalos de 1 nm, dentro del software ENVI 5.3, mediante la herramienta *Spectral Library Builder* (Figura 4.8).

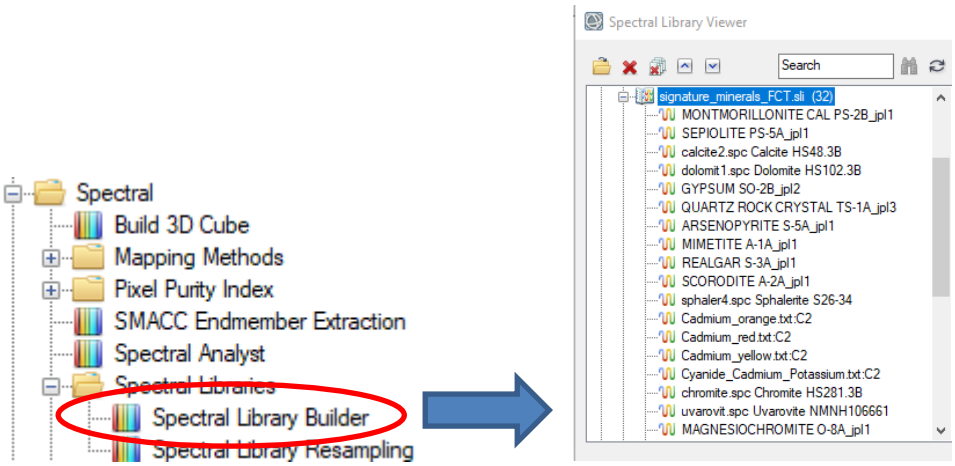


Figura 4.8: Creación de librería espectral personalizada.
Fuente: Bibliotecas espectrales en ENVI de: JPL (2018); USGS (2017).

4.4.2. Transformación de imagen mediante técnica de Crósta

La técnica de Crósta utiliza como insumo la columna denominada "Bandas para ACP" de la Tabla 4.7, correspondiente a las bandas espectrales de las imágenes Sentinel-2. Cabe recordar que, dichas imágenes presentan un nivel de procesamiento L2A, esto quiere decir que sus valores se encuentran en ρ_{BOA}.

Previamente, se realizó un resampleo de las bandas de cada una de las imágenes Sentinel-2 empleadas, definiendo un píxel de salida de 10 m, además, se aplicó un factor de escala de 10k para obtener valores de reflectividad que fluctúen entre 0 y 1, y, por último, se recortaron las imágenes en función de las áreas test de España, con la finalidad de optimizar el tiempo de ejecución de los procesos y el rendimiento del equipo.

Posteriormente, se desarrolló un análisis de CP diferenciado, a partir del cual se seleccionó la CP que contiene información relacionada al mineral estudiado, para esto se analizaron los pesos o cargas factoriales de la matriz de vectores propios, de preferencia se opta por la CP que contenga cargas fuertes y signos opuestos entre las bandas que poseen mayor contraste espectral (Bragado-Massa et al., 2014; Loughlin, 1991).

Es de importancia mencionar que, la matriz de vectores propios entregada por el *software* ENVI, muestra la correlación estadística entre las CP (variable dependiente, filas) y las bandas de la imagen de entrada (variable independiente, columnas) (GeoScene, 2023).

Debido a la repetitividad del proceso, se realiza una descripción minuciosa para el primer mineral analizado, en este caso la montmorillonita, y para el resto de análisis se presentan únicamente las cargas factoriales obtenidas en las CP de interés.

Como se manifestó anteriormente, para resaltar posibles zonas con presencia de montmorillonita, las bandas reflectivas empleadas corresponden a los canales 7 y 11, y las absortivas a los canales 9 y 12, ambas provenientes del sensor Sentinel-2. A partir de estos canales, las bandas de mayor contraste identificadas en la firma espectral proveniente de la JPL, son las bandas 11 y 12, debido a la presencia de hidróxidos de aluminio y de contenido de agua en su estructura. Cabe mencionar que, la bentonita es una arcilla de grano muy fino, por ende, su presencia se manifiesta sobre todo en aquellas porciones del espectro que van de los 1100 a los 2500 nm (Shin et al. 2020), siendo esto primordial a la hora de decidir la CP que alberga la información requerida.

La imagen utilizada correspondiente a la zona PRS data del 03/01/2021 (estación de invierno). En función de la matriz de vectores propios, se evidencia que la montmorillonita puede ser detectada en píxeles oscuros de la CP4 debido a que la banda 11 presenta una fuerte carga negativa y viceversa la banda 12, como se indica a continuación:

Tabla 4.8: Matriz de autovectores del ACP, caso: Montmorillonita (2021), zona del PRS.

2021_PRS	B7	B9	B11	B12	Valor Propio (%)
CP1	-0,4811	-0,3735	-0,6063	-0,5114	78,9238
CP2	-0,5410	-0,5708	0,3537	0,5064	17,0404
CP3	-0,6869	0,7219	0,0805	0,0236	3,1390
CP4	0,0636	0,1167	-0,7077	0,6939	0,8969

Como se puede evidenciar en la Tabla 4.8, la CP3 también posee cargas fuertes y de signos contrarios en los canales 7 y 9, sin embargo, las bandas de mayor contraste espectral y relevancia por la composición química de la bentonita, son los canales 11 y 12.

A la CP4 se le aplicó una negación, con la finalidad de que el mineral pueda ser resaltado por píxeles brillantes, en lugar de píxeles oscuros. Dicha negación se la obtiene mediante una multiplicación por un factor de -1. Esto se lo realiza debido a que, la banda 11 reflectiva presenta una carga negativa y viceversa sucede en la banda 12 (Loughlin, 1991).

Otra de las recomendaciones propuestas por Loughlin (1991) es aplicar un estiramiento del histograma de tipo gaussiano sobre las bandas reflectivas y absortivas previo a la transformación lineal. Se empleó esta recomendación (Tabla 4.9), sin embargo, se obtuvieron resultados similares a la matriz de autovectores de la Tabla 4.8.

Tabla 4.9: Matriz de autovectores del ACP, caso: Montmorillonita, histograma mejorado.

2021_PRS ***stretch***	**B7**	**B9**	**B11**	**B12**	**Valor Propio (%)**
CP1	-0,5047	-0,4711	-0,5304	-0,4919	78,1614
CP2	-0,4152	-0,5901	0,3864	0,5745	17,2637
CP3	-0,7543	0,6483	0,0796	0,0673	3,7549
CP4	0,0630	0,0978	-0,7504	0,6507	0,8200

En el supuesto de que las bandas con mayor contraste espectral presenten cargas factoriales altas, tanto en la CP3 como en la CP4, se procedería a utilizar la alternativa propuesta por Loughlin (1991), aplicando un ACP "por pares" a las bandas CP3 y CP4, para lo cual previamente se debería realizar un mejoramiento de histograma de tipo gaussiano. La CP resultante es la que presente cargas factoriales positivas en la matriz resultante de autovectores.

A continuación, en la Tabla 4.10 se presenta un resumen de las matrices de autovectores obtenidas a partir de la transformación mediante la técnica Crósta, para cada uno de los minerales en cuestión.

Tabla 4.10: Matriz de autovectores del ACP de los minerales en estudio, zonas PRS y RG.

Mineral/Metal	**CP**	**Bandas espectrales**				**Valor Propio (%)**
MINERALES CON MAYOR PRESENCIA EN PRS						
Sepiolita *2021_PRS*		*B3* ^{A}	*B5* ^{R}	*B11* ^{R}	*B12* ^{A}	
	*CP3**	0,3074	-0,4424	-0,4678	0,7007	1,4851
	CP4	0,5356	-0,6286	0,4618	-0,3235	0,9901

Mineral/Metal	CP	Bandas espectrales				Valor Propio (%)
Calcita *2021_PRS*		*B2 A*	*B8 R*	*B11 A*	*B12 R*	
	CP3	0,9489	-0,1262	-0,2892	-0,0006	5,8824
	*CP4**	0,1815	-0,1580	0,6661	-0,7060	0,9050
Dolomita *2021_PRS*		*B2 A*	*B4 A*	*B6 R*	*B12 R*	
	*CP3**	0,5704	0,4019	-0,0091	-0,7162	9,0395
	CP4	-0,7172	0,6688	-0,0084	-0,1958	1,1299
Yeso *2021_PRS*		*B3 R*	*B8 A*	*B11 R*	*B12 A*	
	CP3	0,9139	-0,2269	-0,3367	0,0042	5,2402
	CP4	0,1987	-0,1790	0,6511	-0,7103	0,8734
MINERALES CON PRESENCIA DE METALES PESADOS						
As *2021_PRS*		*B1 A*	*B5 R*	*B8 A*	*B12 R*	
	CP3	-0,7455	-0,4203	0,0890	0,5096	5,4945
	*CP4**	0,6176	-0,7061	0,1934	0,2874	1,6484
2021_RG	*CP3*	-0,5824	-0,6120	-0,0420	0,5335	6,8966
	*CP4**	0,7715	-0,6103	0,0987	0,1499	1,7241
Cd *2021_PRS*		*B4 A*	*B7 R*	*B8 A*	*B12 R*	
	CP3	-0,7621	0,1919	-0,0917	0,6115	4,3860
	CP4	-0,1497	-0,7341	0,6471	0,1408	1,3158
2021_RG	*CP3*	-0,8024	-0,0841	-0,0411	0,5893	5,1282
	CP4	0,0278	-0,7270	0,6859	-0,0180	0,8547
Cr *2021_PRS*		*B3 R*	*B4 A*	*B8A R*	*B12 A*	
	CP3	0,5001	0,3877	0,0307	-0,7737	7,7320
	CP4	0,7288	-0,6680	-0,0692	0,1336	0,5155
2021_RG	*CP3*	-0,5746	-0,4263	-0,1990	0,6697	9,3264
	*CP4**	-0,7136	0,6787	0,0673	-0,1602	0,5181
Cu *2021_PRS*		*B4 A*	*B6 R*	*B11 A*	*B12 R*	
	CP3	0,8791	-0,1921	-0,4253	-0,0968	6,2780
	*CP4**	0,1867	-0,1967	0,6387	-0,7201	0,8969
2021_RG	*CP3*	0,8180	0,2933	-0,4717	-0,1499	8,4112
	*CP4**	0,2641	-0,1025	0,6254	-0,7271	0,9346

Mineral/Metal	CP	Bandas espectrales				Valor Propio (%)
Hg *2021_PRS*		*B7*^{R}	*B8A*^{A}	*B11*^{R}	*B12*^{A}	
	CP3	0,3494	-0,1892	-0,6607	0,6369	0,8333
	CP4	0,6301	-0,6775	0,2743	-0,2624	0,4167
2021_RG	*CP3*	0,3370	-0,1989	-0,6694	0,6315	1,4612
	CP4	0,6350	-0,6733	0,2911	-0,2424	0,1753
Ni *2021_PRS*		*B8A*^{A}	*B9*^{R}	*B11*^{A}	*B12*^{R}	
	CP3	-0,6598	0,7416	-0,0188	0,1198	2,6667
	CP4	0,1651	0,0191	-0,7154	0,6787	0,8889
2021_RG	*CP3*	-0,7042	0,6881	0,1280	-0,1194	1,5385
	CP4	-0,0431	0,2046	-0,7228	0,6586	1,1538
Pb *2021_PRS*		*B3*^{A}	*B5*^{R}	*B6*^{A}	*B12*^{R}	
	CP3	0,7788	0,2176	-0,4386	-0,3920	5,4945
	*CP4**	0,4723	-0,8203	0,2254	0,2307	1,0989
2021_RG	*CP3*	0,6986	0,4175	-0,0721	-0,5766	9,8765
	*CP4**	0,6101	-0,7694	0,0769	0,1726	1,2346
Zn *2021_PRS*		*B4*^{R}	*B6*^{A}	*B11*^{R}	*B12*^{A}	
	CP3	0,8791	-0,1921	-0,4253	-0,0968	6,2780
	CP4	0,1867	-0,1967	0,6387	-0,7201	0,8969
2021_RG	*CP3*	0,8180	0,2933	-0,4717	-0,1499	8,4112
	CP4	0,2641	-0,1025	0,6254	-0,7271	0,9346

*CP multiplicada por un factor de -1; ^{A} Banda absortiva; ^{R} Banda reflectiva

4.4.3. Clasificación no supervisada

Las CP seleccionadas fueron clasificadas en función de la supuesta presencia de los distintos minerales, para lo cual se empleó el clasificador no supervisado *k-means*, con 3 iteraciones y 10 clases como subproducto, las cuales fueron posteriormente agrupadas o fusionadas, obteniendo 5 clases de escala relativa: ninguna, poca, mediana, alta y gran presencia del elemento en estudio.

Además, se aplicó un filtrado de moda, de tipo *majority*, 5x5 y un peso del píxel central de 2, con la finalidad de obtener una imagen más homogénea, evitando el

ruido que puede existir a lo largo de la misma. Estos procesos fueron ejecutados en *software* ENVI.

El ejemplo mostrado a continuación (Figura 4.9) corresponde al proceso de clasificación realizado sobre la CP seleccionada para la detección de montmorillonita, para lo cual el flujo de procesos empleados fue: clasificación > fusión > filtro *majority* > conversión a vector.

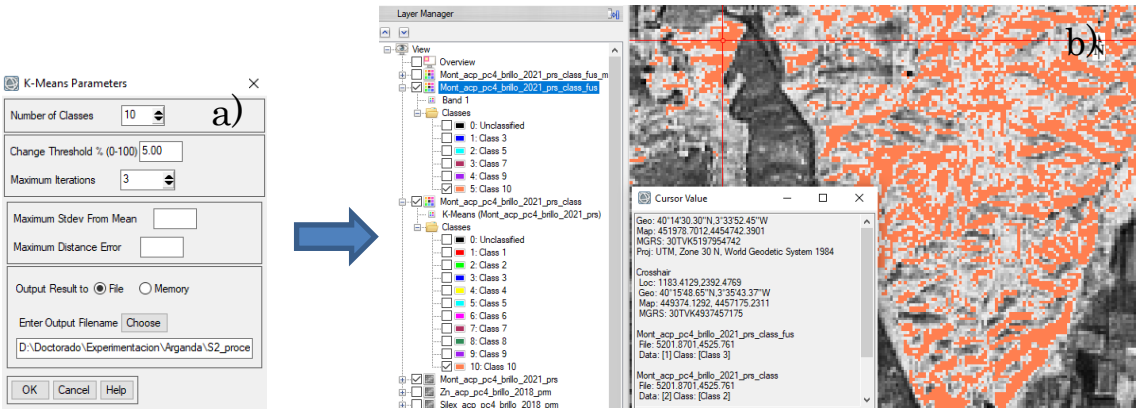


Figura 4.9: Secuencia de procesos de la clasificación no supervisada: a) clasificador no supervisado *k-means*; b) producto fusionado.

4.4.4. Localización geoespacial de minerales

Una de las alternativas, para poder visualizar aquellas zonas con presencia de minerales es mediante el uso de gráficas bidimensionales (*scatter plot*) a partir de las bandas espectrales seleccionadas para el ACP, por ejemplo, para el caso de montmorillonita, se evidencia en las gráficas de la Figura 4.10 una alta correlación entre las bandas reflectivas y absortivas, sin embargo, en la confrontación entre las bandas 11 y 12 (Figura 4.10a), existe una mayor facilidad para discriminar aquellas zonas más brillantes de la CP4.

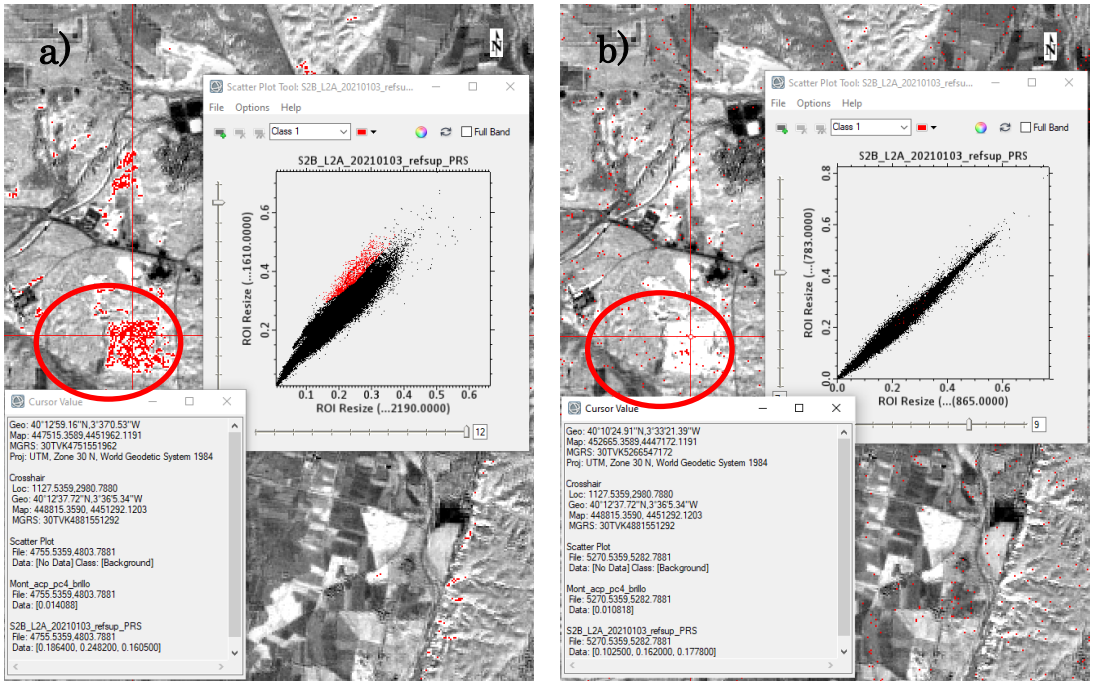


Figura 4.10: *Scatter plot*: a) bandas 11 vs 12; b) bandas 7 vs 9.

Otra de las alternativas, para localizar geoespacialmente los minerales en estudio es a través de la composición Crósta (Bragado et al., 2009; Loughlin, 1991), en donde los resultados de las CP son presentados en el plano RGB, siendo esta una manera usual de hacerlo. Para el siguiente ejemplo, se tomaron los resultados de las CP de la montmorillonita o bentonita (imagen B) y de la sepiolita (imagen S), la primera es ingresada en el cañón rojo, la segunda en el cañón azul, y la sumatoria de ambas bandas se proyecta por el cañón verde.

El resultado (Figura 4.11) muestra a la bentonita con colores naranja y café oscuro, la sepiolita con color azul claro, las zonas urbanas con color negro (ausencia de estos minerales), y aquellas zonas de color cian tenue corresponde a una mezcla de sepiolita y bentonita, predominando el primero.

Figura 4.11: Combinación Crósta: B, B+S, S.

A pesar de las bondades que ofrecen los dos métodos anteriores, hay un tercer método o proceso útil a la hora de realizar la localización geoespacial de minerales, denominado como interpretación visual. Para esto, las CP seleccionadas y procesadas fueron incorporadas al *software* ArcGIS, en donde se realizó una verificación con respecto a información secundaria proveniente de entidades oficiales, esto con la finalidad de desechar casos claros de no existencia de minerales o falsos positivos. Dicha información secundaria consta de: mapas geológicos y metalogenéticos del IGME, cobertura vegetal del proyecto SIOSE, datos provenientes de la CM y Junta de Andalucía, y banco de imágenes disponibles en ESRI.

Cabe mencionar que, en caso de existir un número considerable de zonas erróneas de detección de un mineral, esto puede ser atribuido a:

- Selección inadecuada de bandas reflectivas y absortivas.
- Analogía con las bandas de las imágenes Sentinel-2 no conllevan a un resultado adecuado.
- Elección equívoca de la CP.

Estos inconvenientes pueden ser solucionados mediante:

- Elección de otra CP
- Selección de otras bandas absortivas y/o reflectivas, en caso de que exista una analogía con las bandas Sentinel-2.
- Elegir otro mineral en donde predomine el elemento estudiado.

La presente interpretación visual está orientada a la planificación de campañas de campo y definición tanto de estaciones muestrales como recorridos óptimos dentro de la zona test, para lo cual se seleccionó superficies con suelo desnudo y cultivos, obviando áreas boscosas, edificaciones, etc., que evidentemente influyen en la reflectividad.

A continuación, se presenta la localización geoespacial preliminar de los minerales tipo del PRS, en contraste con la información secundaria, y, por otro lado, se exhibe las ubicaciones iniciales de aquellos minerales con presencia de metales pesados.

a. Minerales con mayor presencia en PRS

- Montmorillonita

  Dentro de la CP obtenida, se detectó en alta y gran presencia en los relieves colinados (<650 msnm) del terciario que se encuentran circundando los canales de los ríos Jarama, Tajuña y Tajo, en donde las arcillas y el yeso son predominantes según el mapa de minerales y rocas industriales a escala 400k. Una presencia evidente de este mineral se encuentra al oeste de San Martín de la Vega, en la desembocadura del río Manzanares en el río Jarama, y al este del poblado Balcón del Tajo (Figura 4.12).

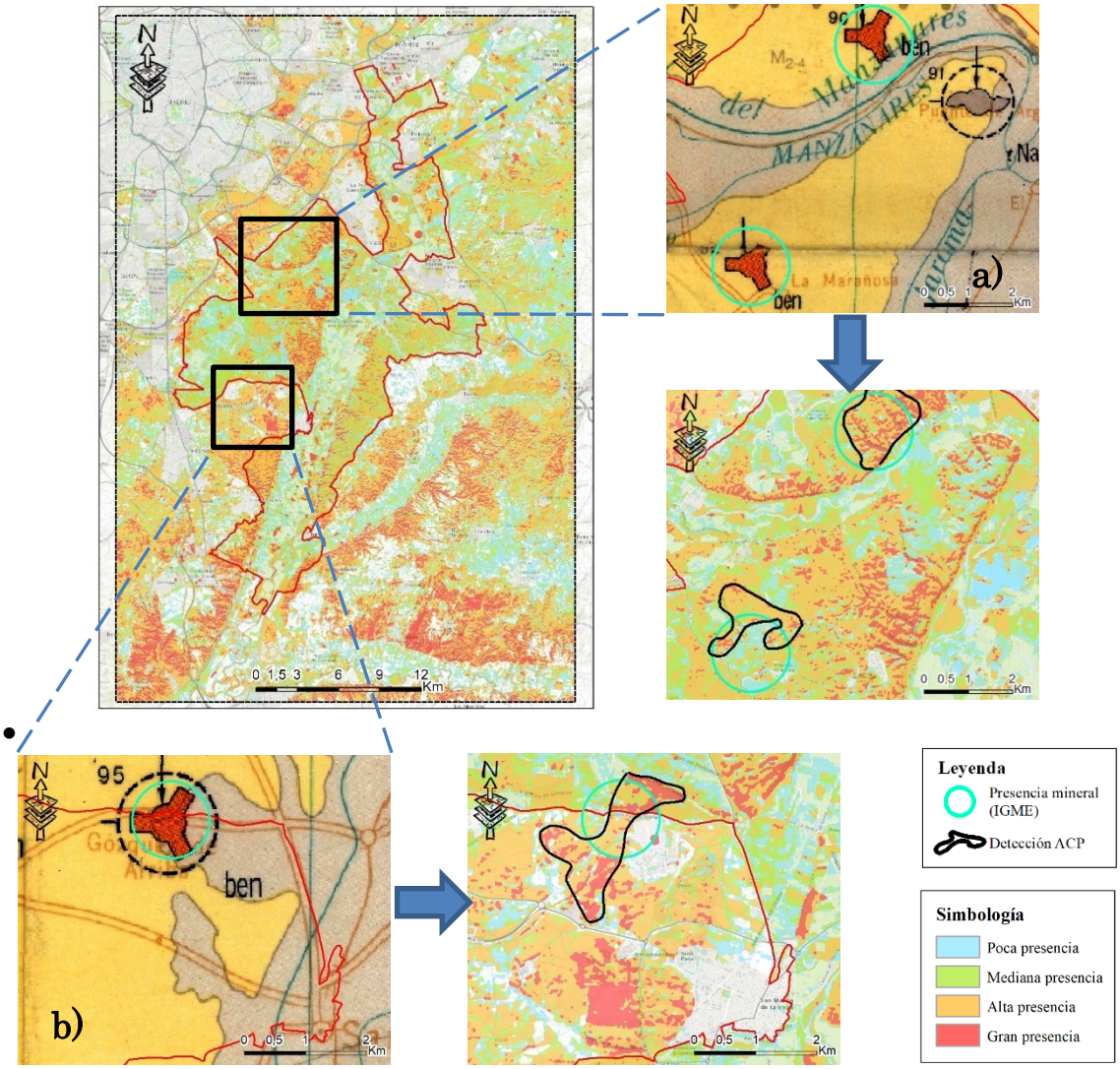


Figura 4.12: Detección de montmorillonita: a) río Manzanares; b) San Martín de la Vega.

La leyenda empleada en la Figura 4.12, representa las menas cartografiadas por el IGME (círculo de color celeste) versus el producto obtenido mediante ACP derivado de la aproximación inicial (polígono de color negro). Por otro lado, la simbología representa una escala categórica de la posible presencia del mineral característico a lo largo de la zona de estudio. Tanto la simbología, como la leyenda son empleadas en los apartados subsiguientes.

- Sepiolita

Existe una alta y gran presencia de sepiolita a lo largo de toda la zona de estudio PRS, exceptuando en áreas urbana. El resultado obtenido a partir de la imagen del año 2021 refleja su presencia en los polígonos industriales localizados junto al río Manzanares, sobre la localidad con nombre similar al mineral, además, se localizan al Oeste de Valdemoro (Figura 4.13).

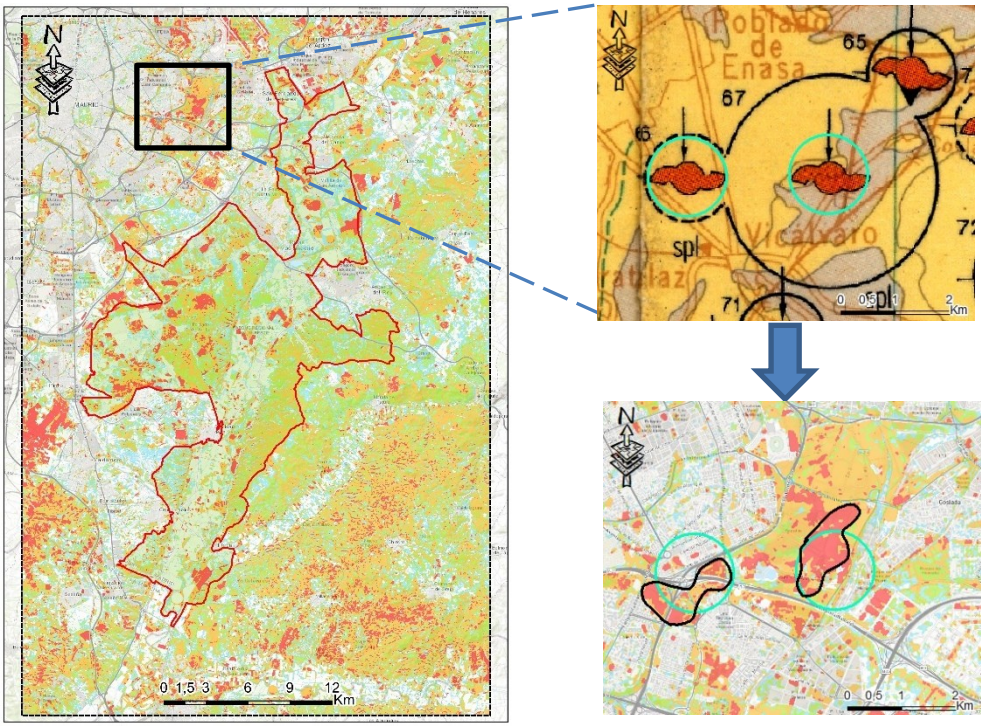


Figura 4.13: Detección de sepiolita: Vicálvaro.

- Calcita

La calcita fue detectada sobre los relieves colinados terciarios (>650 msnm) ubicados al este y sureste del PRS, en los alrededores de los poblados de Chinchón, Colmenar de Oreja y Belmonte, similar a lo indicado en el mapa de minerales. Además, fue detectada en los canales del Jarama y Tajo, pudiendo encontrarse intercalada con los sedimentos detríticos, y en las zonas urbanas, sobre todo en Madrid, pudiendo deberse a la presencia de tejado en las construcciones, el cual podría contener calcita en caso de tratarse de tejados de tipo pizarra (Figura 4.14).

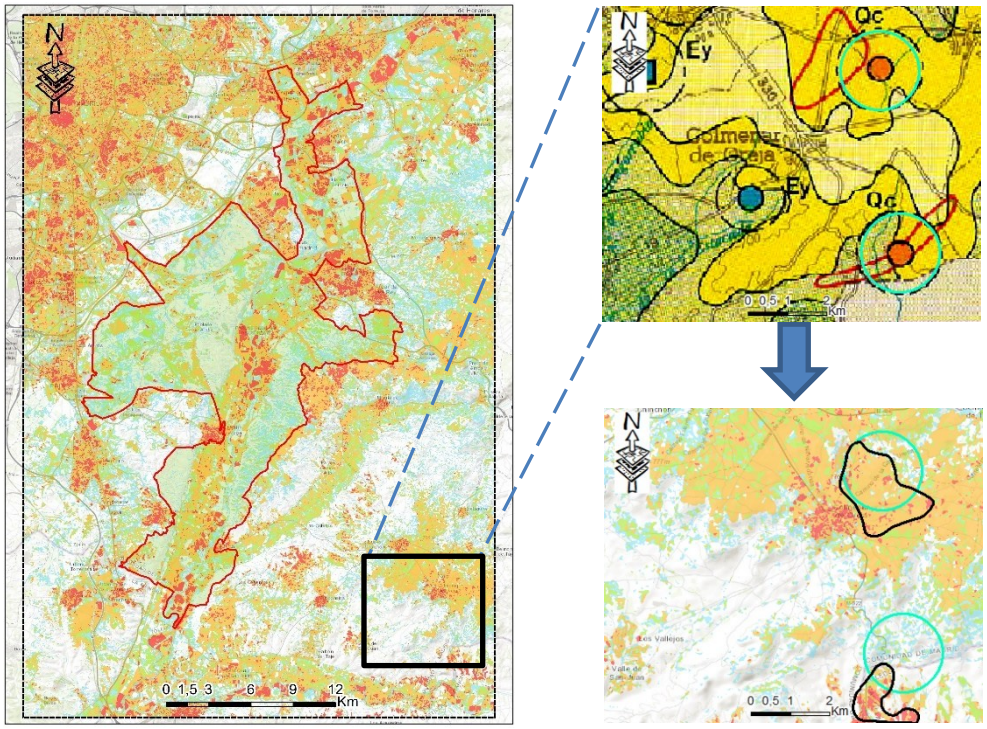


Figura 4.14: Detección de calcita: Colmenar de Oreja.

- Dolomita

En el caso de la dolomita, la misma fue detectada en los alrededores de los poblados de Colmenar de Oreja, Campo Real, y en el canal del río Tajo, pudiendo deberse a la depositación de material proveniente de los relieves circundantes. Dentro de los mapas geológicos se presentan la calcita y la dolomita como una asociación, por ende, su representación gráfica se torna complicada, ya que no se puede contrastar con información secundaria que contenga lugares con presencia de menas del mineral dolomita.

- Yeso

En función de los mapas geológicos y metalogenéticos, el yeso presenta intercalaciones con la montmorillonita, el mismo fue detectado a lo largo de las estribaciones de los relieves colinarios del terciario que rodean los ríos Tajuña y Tajo, p. ej. en los poblados de Ciempozuelos y Valdemoro, sobre mineras en estado inactivo, además, al oeste del canal del río Jarama, al este del polígono industrial Silicatos, y en la planta de combustibles CLH Torrejón (Figura 4.15).

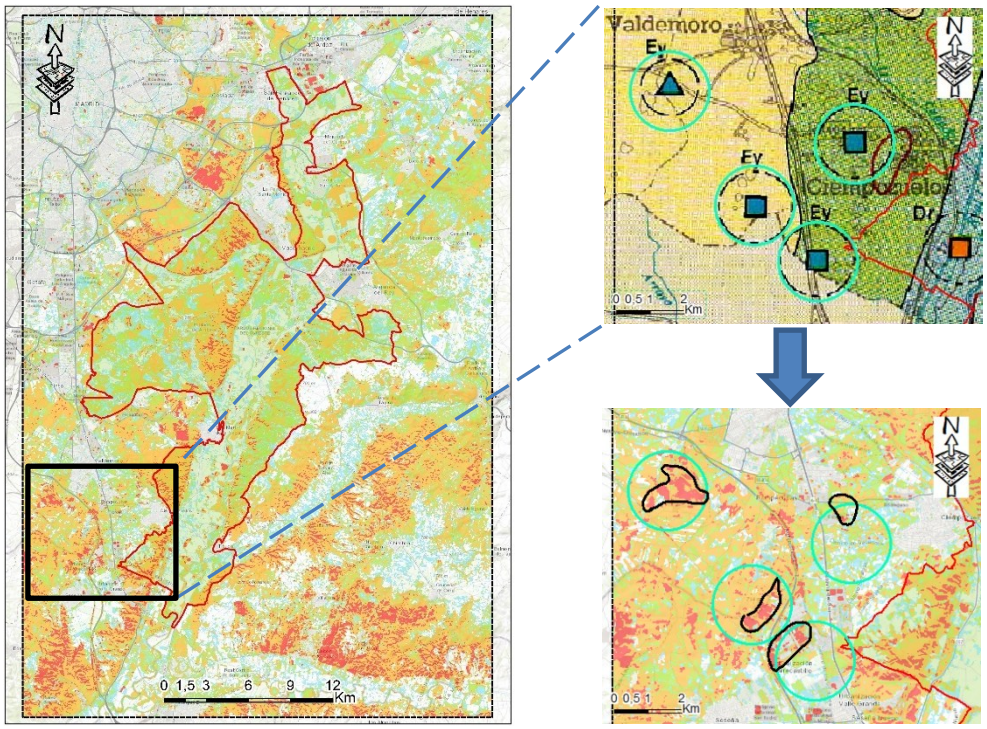


Figura 4.15: Detección de yeso: Colmenar de Oreja.

b. Minerales con presencia de metales pesados

A continuación, se realiza similar proceso sobre los minerales con presencia de elementos traza. De manera general, se puede observar que las masas boscosas, en gran parte de los productos de las CP seleccionadas, se encuentran asociadas a las clases ninguna y poca presencia de metales pesados.

- Escorodita / As

  Se puede detectar en el PRS una alta y gran presencia de As tanto en los relieves colinados terciarios ubicados entre los canales Tajo, Tajuña y Jarama, además, de manera esporádica se evidencia sobre las construcciones de las diferentes zonas pobladas y polígonos industriales (CLH Torrejón), pudiendo ser producto de aleaciones con plomo o cobre, sin embargo, en su gran mayoría se localizan sobre canteras y olivares, según el mapa del SIOSE.

  En cuanto a los resultados obtenidos en el RG, la CP seleccionada detecta al elemento traza con una alta y gran presencia en los cultivos de arroz regados de Isla Mayor y al noroeste de la zona de estudio, en los alrededores de los poblados de Aznalcóllar y Carrión de los Céspedes (Figura 4.16).

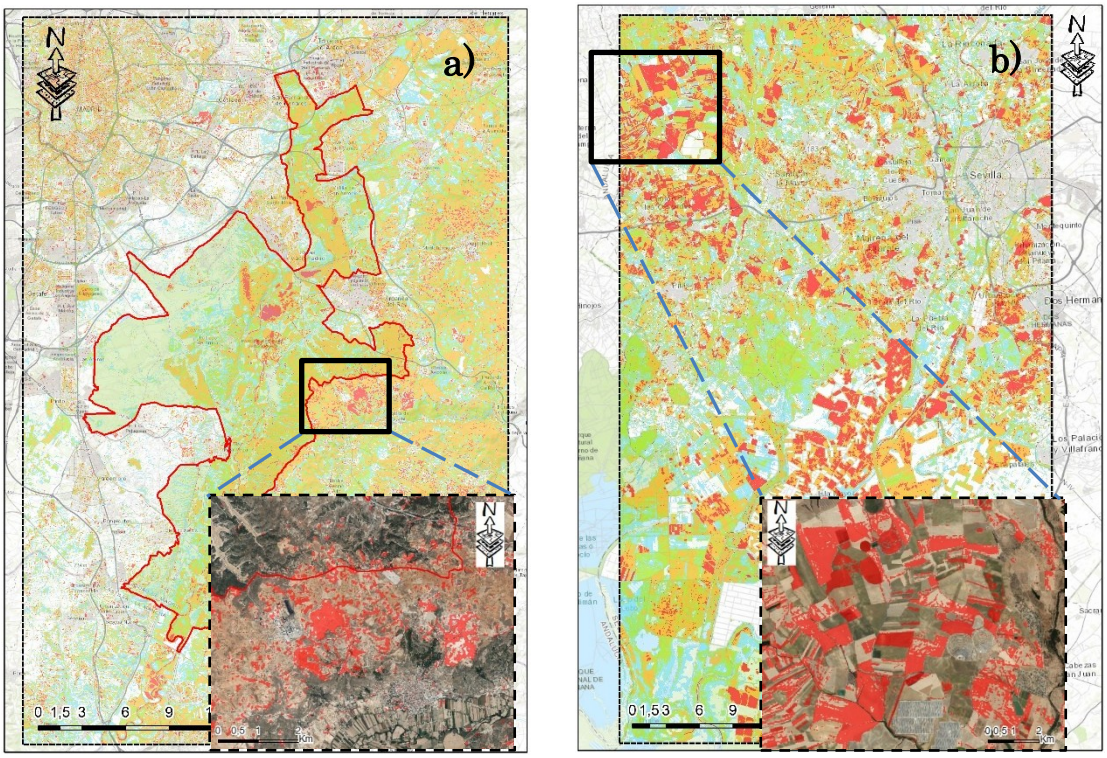


Figura 4.16: Detección inicial de As: a) PRS (canteras de Morata); b) RG (Sanlúcar).

- Cianuro de Cd / Cd

En el PRS se detectó en alta y gran presencia sobre el canal del río Tajo, en las zonas altas (>650 msnm) de los relieves colinados terciarios, en los alrededores a la estación depuradora de agua residual localizada sobre el canal del río Manzanares, en los cultivos próximos a la base aérea de Getafe, entre otros. De igual forma que el As, el Cd forma aleaciones con el Pb que puede ser utilizada en construcciones, por ende, se detecta sobre las zonas pobladas.

En cuanto al valle del RG fue detectado el elemento, sobre la CP seleccionada, en el centro y al centro oeste del área de estudio, en ambos márgenes del río Guadiamar, a los alrededores del pueblo Pilas, además, se localiza al sur de Sevilla, a los alrededores del pueblo Dos Hermanas, al oeste de La Puebla del Río y sobre el parque Doñana al suroeste del área test (Figura 4.17).

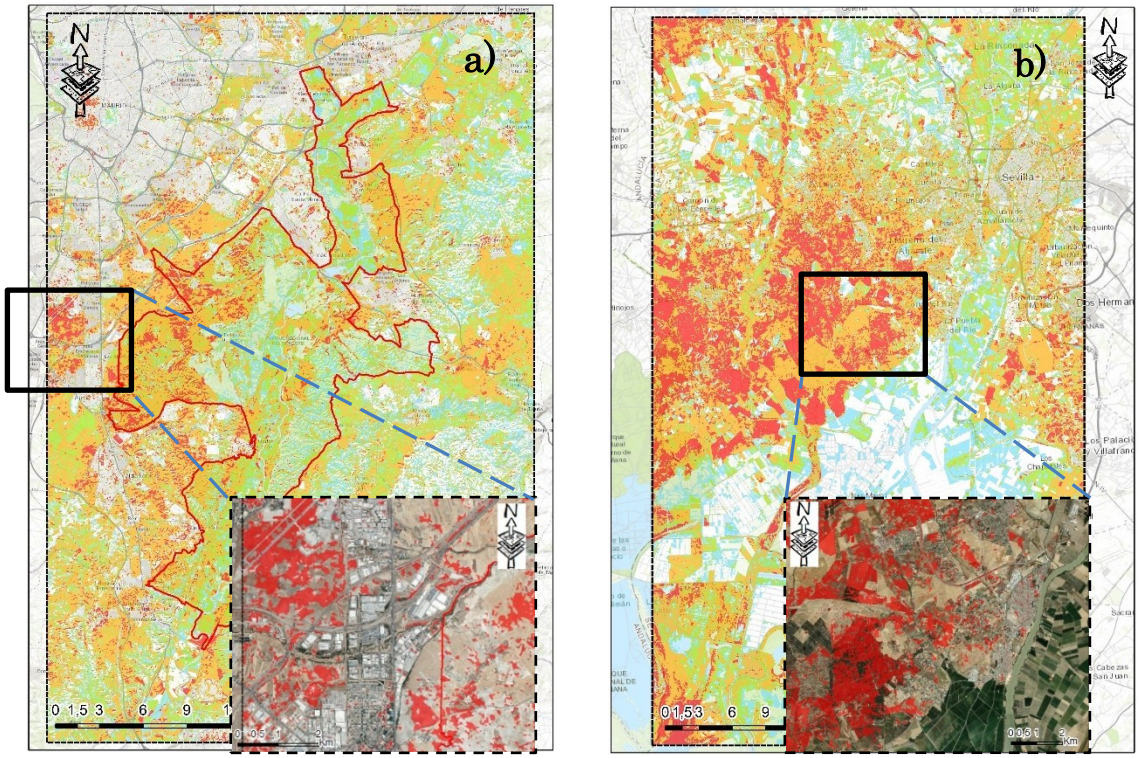


Figura 4.17: Detección inicial de Cd: a) PRS (Getafe); b) RG (La Puebla del Río).

- Magnesiocromita / Cr

La clase gran presencia de Cr pudo ser detectada al oeste del río Jarama del PRS, además, predomina sobre algunos techos de los polígonos industriales, pudiendo ser usado para evitar la corrosión de los tejados, sobre los pastizales al este de Pinto, y en la vegetación herbácea al oeste de Valdemoro.

En cuanto al área test del RG se evidencia sobre el valle del río Guadalquivir per se, adicionalmente, se detectó sobre los tejados de Sevilla y a sus alrededores, al igual que en Sanlúcar la Mayor, y en Los Palacios y Villafranca (Figura 4.18).

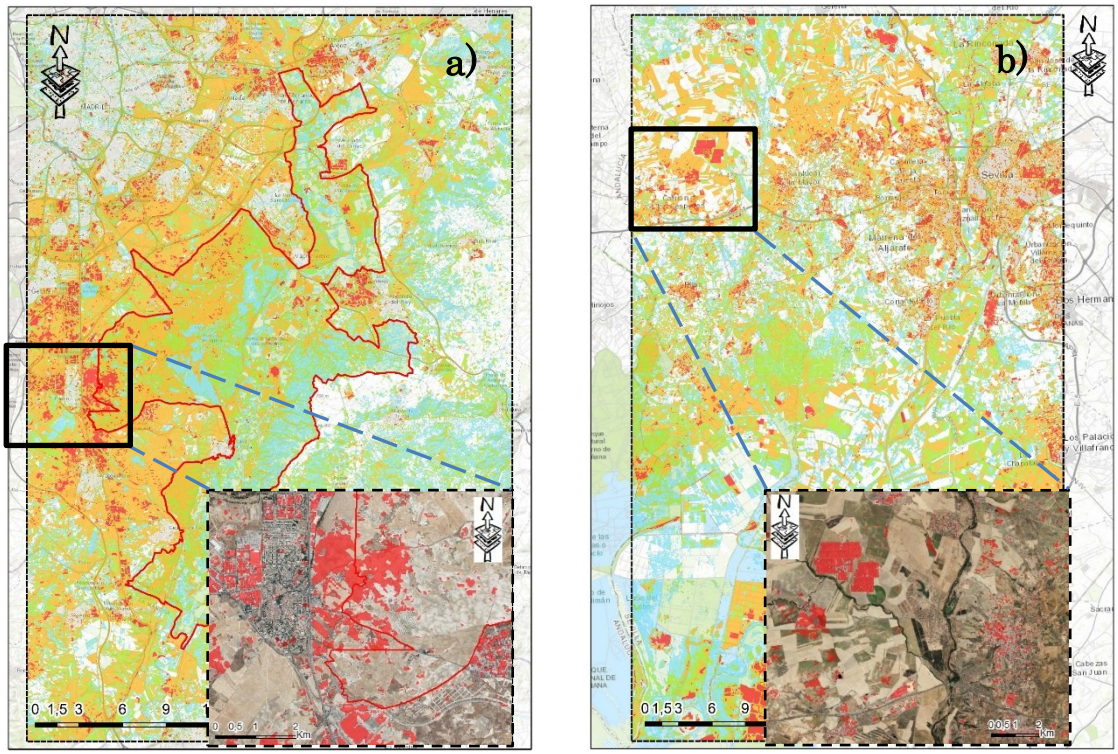


Figura 4.18: Detección inicial de Cr: a) PRS (Pinto); b) RG (Sanlúcar la Mayor).

- Azurita / Cu

El Cu en el PRS fue mapeado en su gran mayoría en zonas pobladas, debido a su presencia en los techos de las construcciones, sobre todo en los cascos históricos, además, se encuentra localizado en alta y gran presencia a lo largo de los canales Jarama y Tajo, sobre cultivos herbáceos.

En cuanto al valle del RG se localiza este elemento al centro y noreste del área test, principalmente en los tejados de Sevilla y a los alrededores de la misma, al igual que los poblados Dos Hermanas y Mairena del Aljarafe (Figura 4.19).

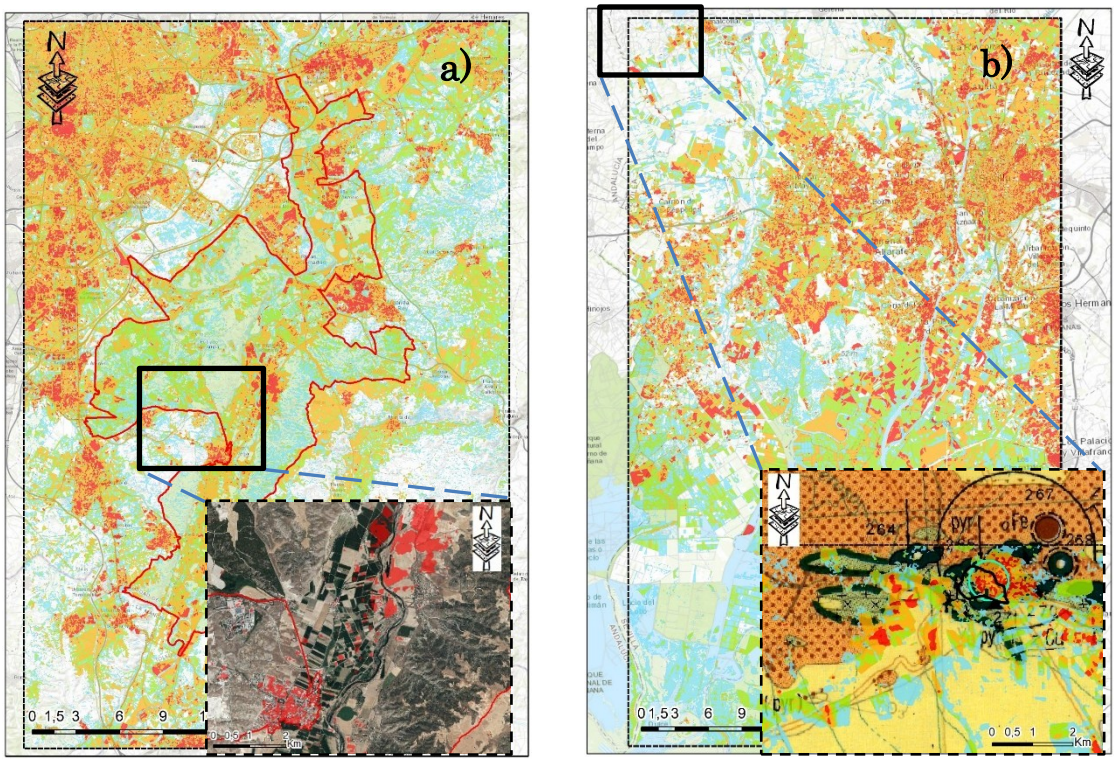


Figura 4.19: Detección inicial de Cu: a) PRS (San Martín de la Vega); b) RG (Aznalcóllar).

- Cinabrio / Hg

La clase gran presencia de Hg se encuentra dispersado a lo largo del PRS, casos puntuales son visibles en las construcciones, sin embargo, las áreas más representativas corresponden a las canteras ubicadas cerca del poblado Morata de Tajuña, y al este del polígono industrial Silicatos. Los canales de los ríos presentan poca o ninguna presencia de este metal.

Por otro lado, en el valle del RG se localiza al norte de la zona de estudio, sobre todo a los alrededores de los poblados Aznalcóllar y Gerena, pudiendo deberse a la alta actividad minera existente (Figura 4.20).

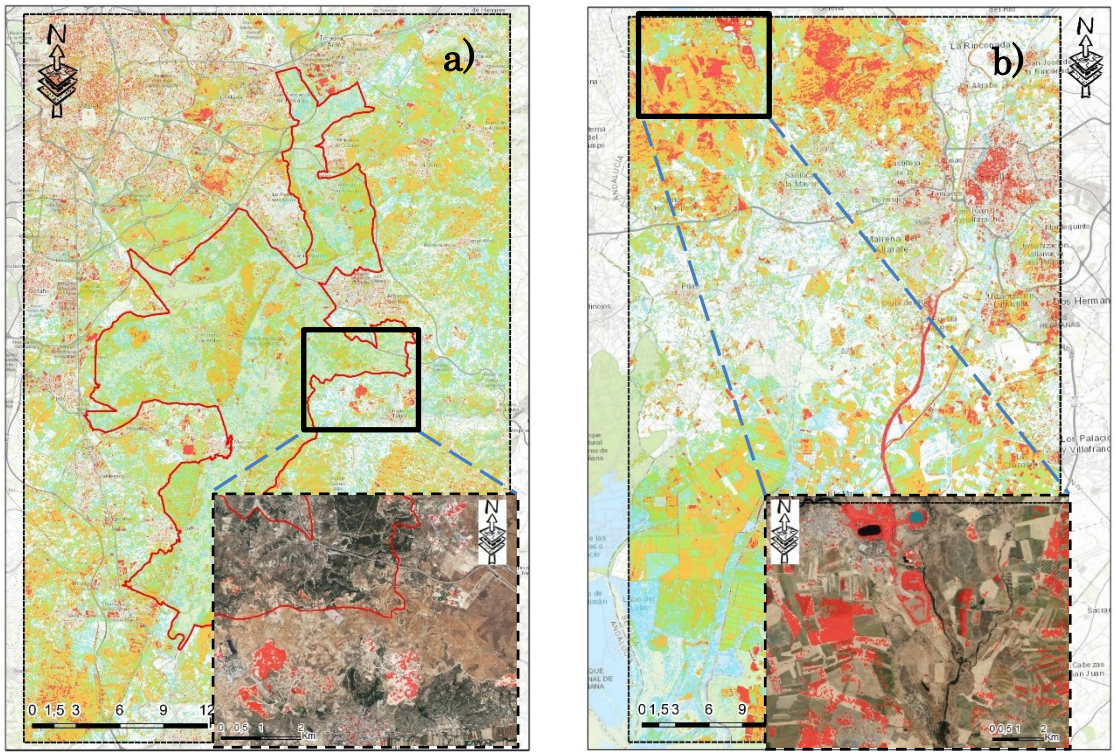


Figura 4.20: Detección inicial de Hg: a) PRS (Morata de Tajuña); b) RG (Aznalcóllar).

- Cianuro de Ni / Ni

Las zonas detectadas de Cu y Ni presentan alta similitud, ya que generalmente el Ni aparece junto con el Cu. Dentro del PRS se encuentra con alta y gran presencia a lo largo de los ríos Tajo y Jarama, sobre cultivos herbáceos, además, en las construcciones de las diferentes zonas urbanas, sobre todo en los cascos históricos de las mismas, y en las vías del ferrocarril.

En cambio, en el valle del RG predomina al este del área de estudio, sobre la ciudad de Sevilla y sus alrededores, y en los poblados Dos Hermanas, La Puebla del Río y Las Cabezas de San Juan (Figura 4.21).

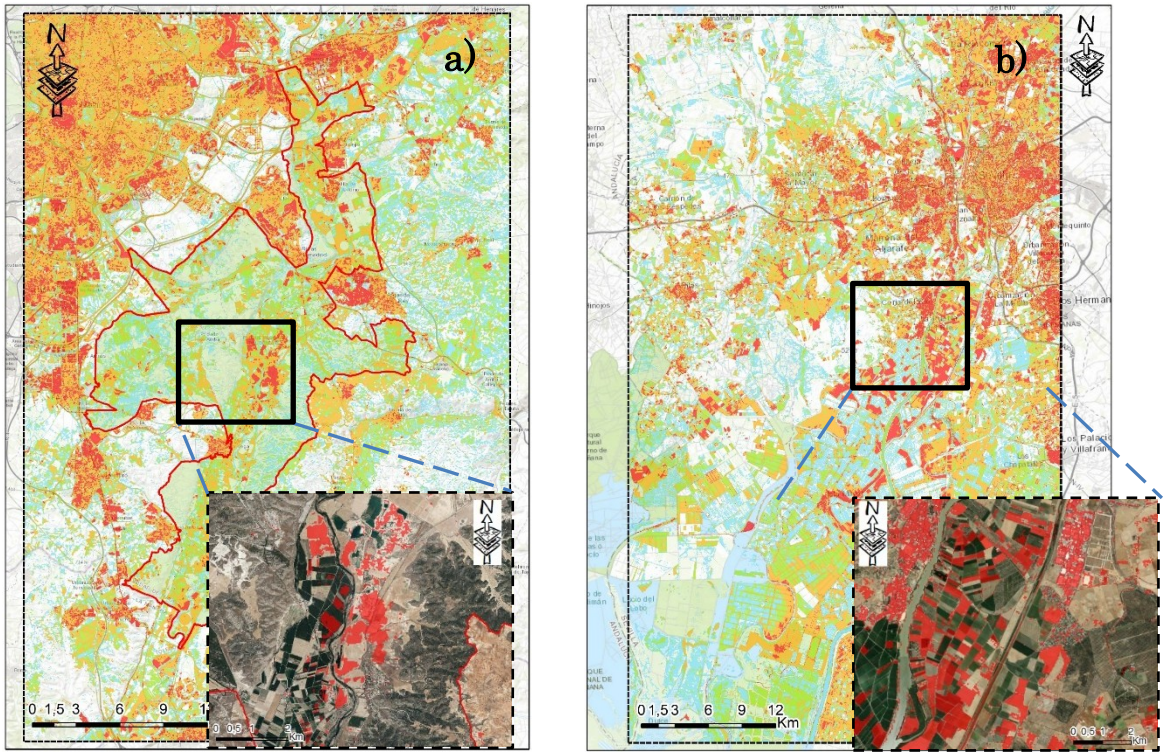


Figura 4.21: Detección inicial de Ni: a) PRS (Vallequillas Norte); b) RG (La Puebla del Rio).

- Cerusita / Pb

El Pb dentro del PRS posee una gran presencia sobre todo en centros urbanos ya que los techos de las construcciones pueden estar diseñadas de Pb con aleaciones de As, Cr, etc., además se presenta en los relieves colinados terciarios ubicados entre los ríos Tajo y Tajuña asociados a cultivos herbáceos, y con una alta y gran presencia en las canteras ubicadas cerca del poblado Morata de Tajuña.

Gran presencia de este metal se da al norte del área test del RG, principalmente en Aznalcóllar y a los alrededores de Carrión de los Céspedes, además, con alta presencia sobre los cultivos de arroz inundados (Figura 4.22).

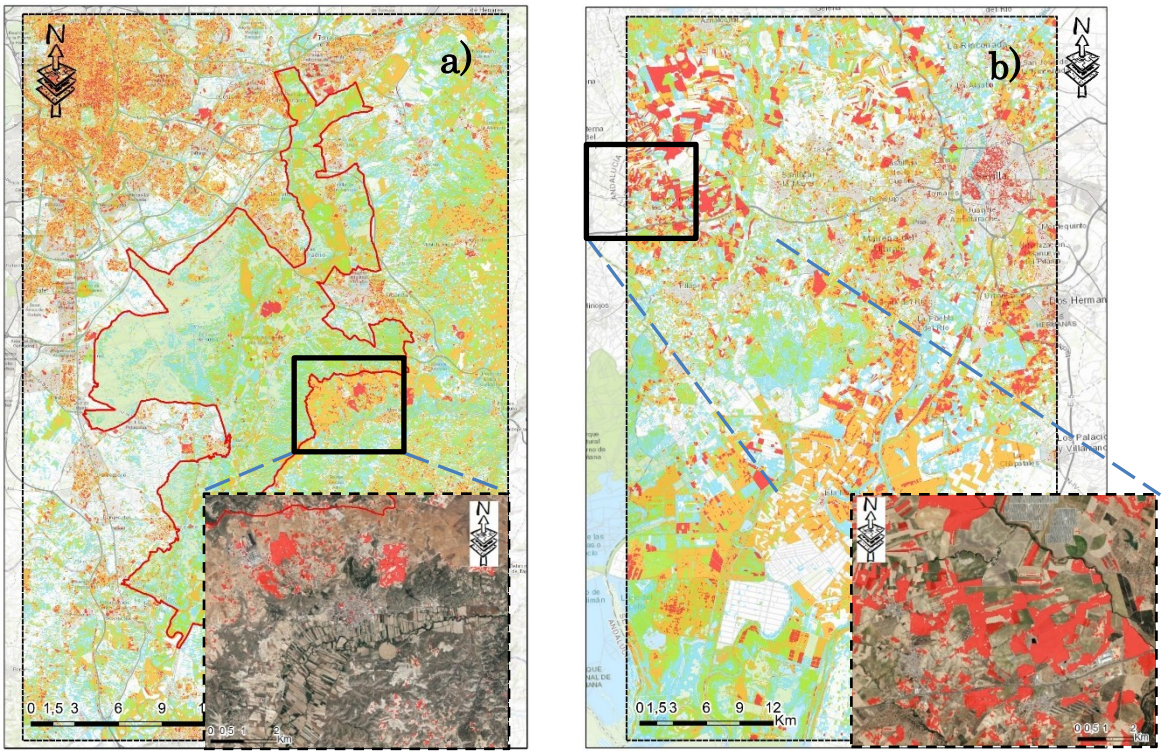


Figura 4.22: Detección inicial de Pb: a) PRS (Morata de Tajuña); b) RG (Carrión de los Céspedes).

- Hemimorfita / Zn

Existe una alta y gran presencia de este metal en los márgenes de los canales de los ríos Tajo, Tajuña y Jarama, teniendo una mayor representatividad sobre los relieves colinados terciarios (<650 msnm) de Villaconejos, donde la vegetación predominante son los cultivos herbáceos y pastizales.

Dentro del valle del RG se localizan a los alrededores de los poblados Sanlúcar la Mayor, al sur de Aznalcóllar y al oeste de Isla Mayor sobre el parque de Doñana, donde predominan los pastizales (Figura 4.23).

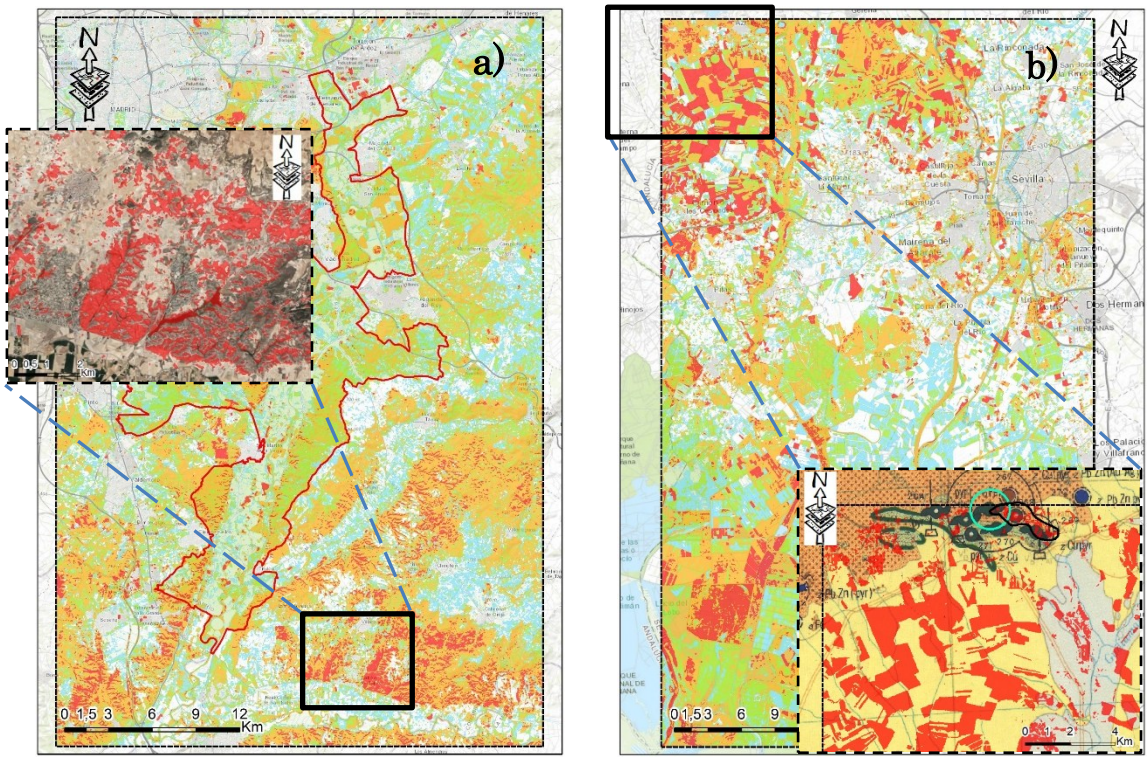


Figura 4.23: Detección inicial de Zn: a) PRS (Villaconejos); b) RG (Aznalcóllar).

4.5. Diseño, preparación y análisis muestral para detección de elementos traza

La presente investigación contó con dos campañas de campo sobre territorio español las cuales permitieron evaluar diferentes parámetros relacionados a la investigación. La primera campaña de campo fue realizada en el PRS, Madrid, la cual fue orientada a la validación experimental del protocolo de captura de datos para espectrometría, siendo sustentada en información bibliográfica.

La segunda campaña fue llevada a cabo en el RG, Sevilla, la cual permitió poner en marcha todo el aprendizaje adquirido durante la primera campaña. Los resultados de ambas salidas de campo alimentaron la base datos de analíticas y firmas espectrales, permitiendo la aplicabilidad de técnicas espectrométricas y la validación de los productos obtenidos.

En resumen, el presente apartado recopila los procesos ejecutados antes, durante y después de las campañas de campo, mismos que son susceptibles de mejora con la finalidad de lograr eficiencia y eficacia a partir de los mismos.

4.5.1. Flujo de actividades involucradas en las campañas de campo

La planificación adecuada de las actividades ligadas a las campañas de campo permite un manejo eficiente del factor tiempo. Dichas actividades a manera de flujo de procesos son detalladas en la Figura 4.24:

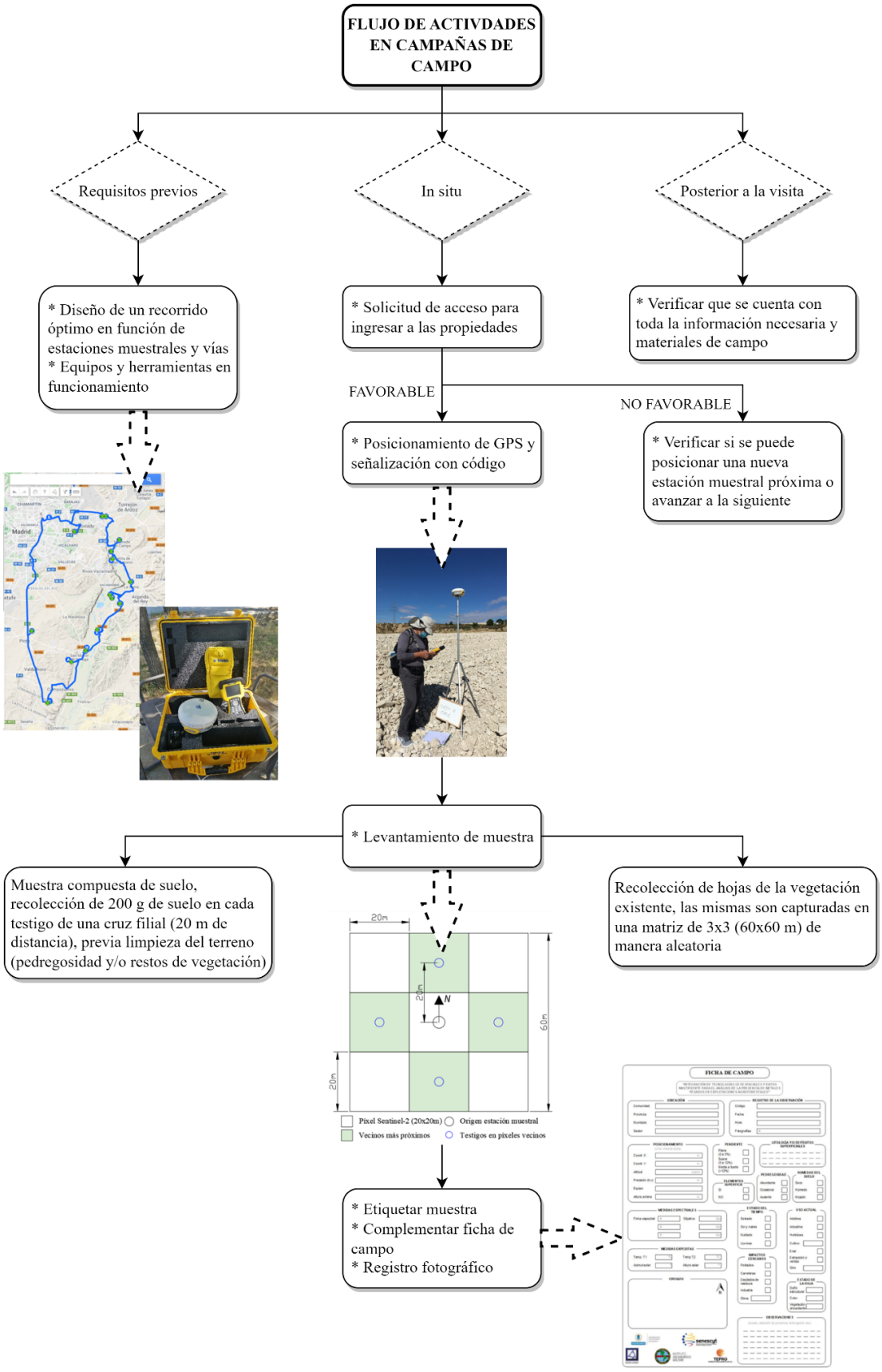


Figura 4.24: Flujo de actividades en campaña de campo.

4.5.2. Diseño del muestreo y toma de muestras

En España, el artículo 27.1 de la Ley 10/98 Básica de Residuos (Jefatura del Estado de España, 1998), determina que, las Comunidades Autónomas deben establecer planes y programas orientados a la gestión de superficies contaminadas, por ende, se han generado diferentes protocolos para la determinación de elementos traza, los cuales como denominador común emplean cartografía temática, principalmente de los aspectos físicos de sus territorios.

En función de esto y con la finalidad de evitar fuentes potenciales de errores, se consideró una serie de parámetros al diseñar el muestreo y su respectiva toma de muestras, los cuales se encuentran detallados a continuación:

a. Esquema espacial del muestreo

Según Peris Mendoza (2006) la selección de un tipo de muestreo está en función de la información de partida para la identificación de las estaciones muestrales, por ende, el método empleado en el presente estudio es de tipo orientado, debido a que, el investigador decidió dónde colocar los diferentes puntos de muestreo. Específicamente, dichos puntos son definidos a priori, a partir de la interpretación visual de los resultados obtenidos al aplicar la técnica Crósta sobre imágenes Sentinel-2, descrita en el apartado anterior.

Al seleccionar las estaciones muestrales se procuró que las mismas se encuentren preferencialmente en zonas donde concurran las siguientes características: facilidad de acceso vial, posibilidad de tomar muestras (in situ y para análisis químico), existencia de datos multifuente (imágenes multi o hiperespectrales actuales y/o históricas), y presencia de la problemática per se (contrastado en alguna fuente de información).

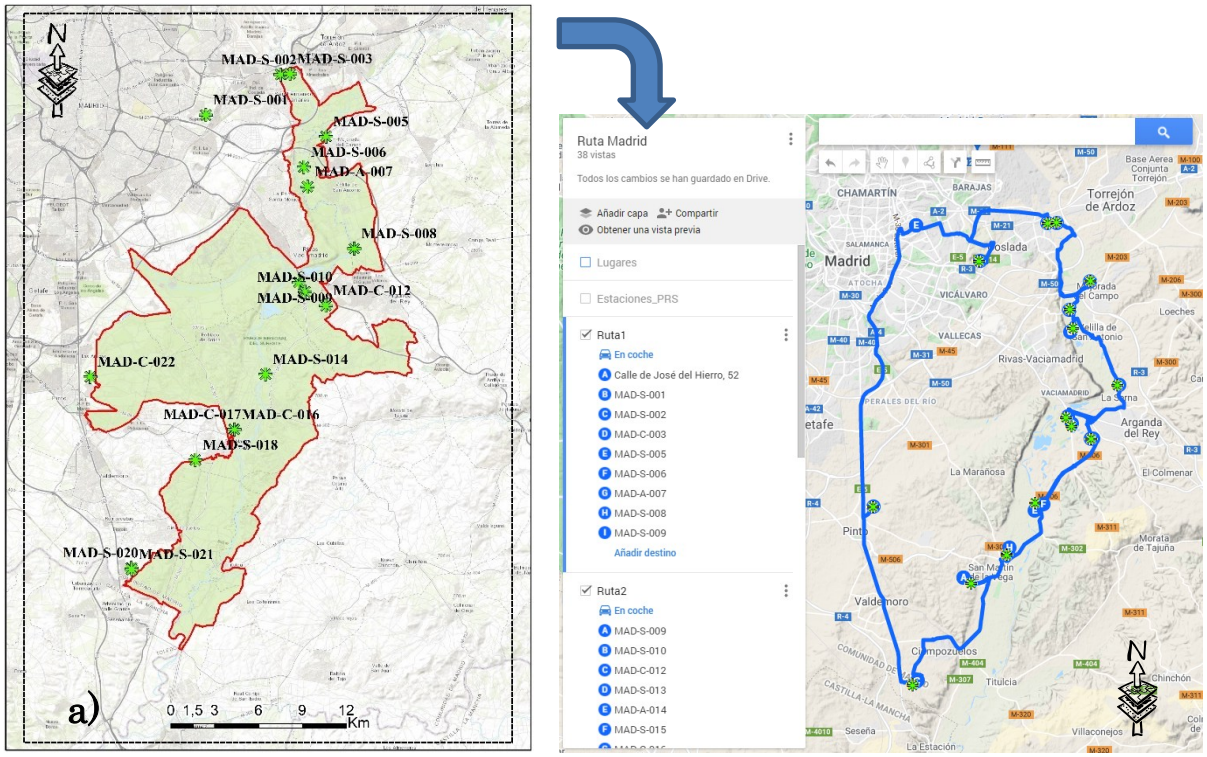
En función de lo comentado, se planificó la posible localización de las estaciones muestrales en gabinete, previo a las campañas en el PRS, Madrid y RG, Sevilla. A partir de esto se obtuvo un número aproximado de muestras planificadas, sobre las superficies de suelo y vegetación. Cabe resaltar que, el diseño metodológico de gabinete difiere del diseño de campo, debido a limitantes relacionadas al impedimento de ingreso a una estación muestral, condicionamiento vial, temporalidad, entre otras. A continuación, se muestra en la Tabla 4.11 el número de muestras planificadas vs ejecutadas en campo:

Tabla 4.11: Número de muestras planificadas vs ejecutadas en áreas test.

Área test	Tipo de muestra	Planificado	Ejecutado
PRS	Suelo	16	12
	Cultivo	8	6
RG	Suelo	24	23
	Cultivo	12	9
TOTAL		**60**	**50**

No se consideró un mayor número de muestras en el PRS, ya que, como se indicó previamente, la primera campaña de campo permitió evaluar el proceso metodológico per se, por lo que no fue recomendable. Por otro lado, poseer un número mayor de muestras hubiese generado un incremento en los costos de la investigación, siendo esto innecesario debido a la finalidad que persigue el presente estudio.

A continuación, se representan las estaciones muestrales ejecutadas, de manera gráfica y numérica (coordenadas cartesianas), tanto del PRS como del RG, las cuales abarcan la mayor variabilidad de metales pesados, siguiendo un recorrido óptimo y procurando que la recolección de las muestras sea representativa dentro de una superficie lo suficientemente homogénea (Figura 4.25).



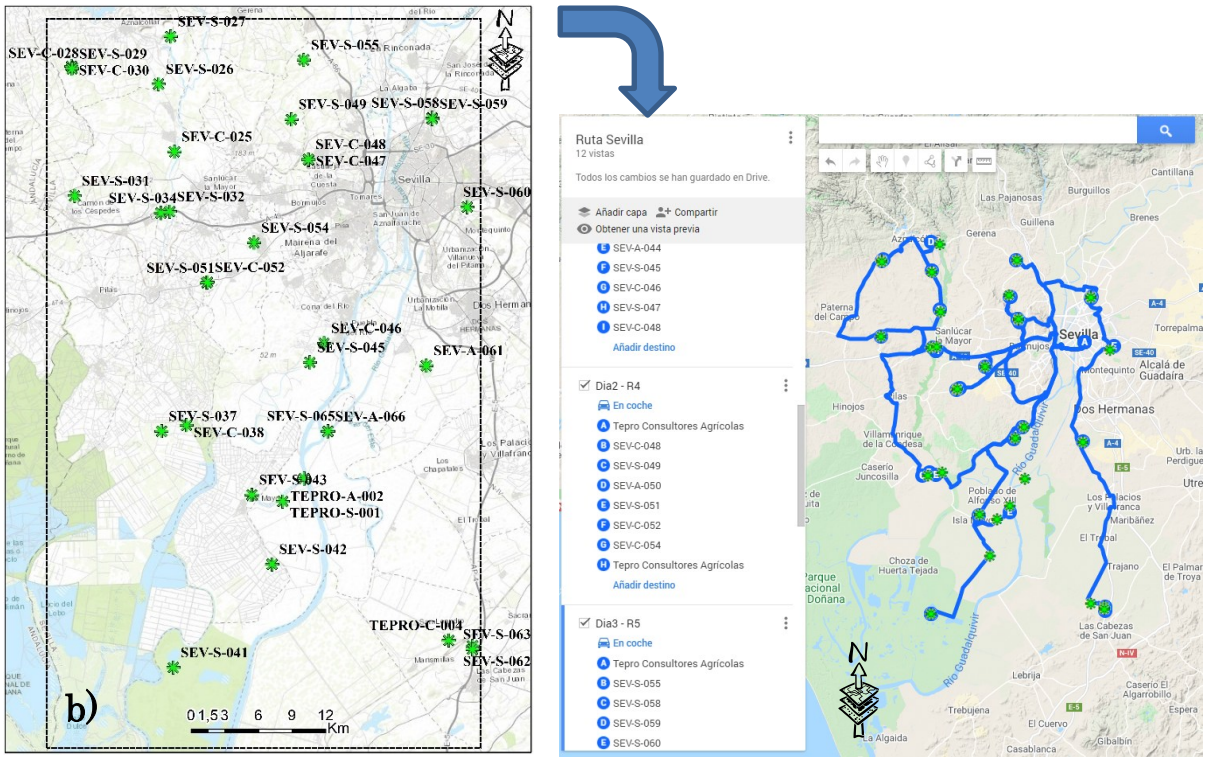


Figura 4.25: Planificación de estaciones muestrales y recorrido en: a) PRS; b) RG. Fuente cartográfica: ESRI (2020); Google (2021).

Para realizar la planificación del recorrido se empleó la herramienta de *Google MyMaps*, y se trabajó en función de la capa de estaciones muestrales. Para el caso del PRS se planificó y ejecutó un circuito de la siguiente forma: Madrid > Torrejón de Ardoz > Arganda del Rey > San Martín de la Vega > Ciempozuelos > Valdemoro > Madrid. En cambio, para el caso del RG se realizó una planificación en función de la experiencia del personal de la empresa TEPRO, dividiendo la campaña de campo en zonas de trabajo: norte, suroeste-centro y este del área test.

b. Campaña de muestreo

Los resultados obtenidos a partir de la campaña de campo se encuentran ligados a la calidad del proceso en la adquisición de los datos, así como a los métodos empleados en oficina y laboratorio, por ende, es necesario seguir un conjunto de medidas, las cuales son descritas a continuación:

- Posicionamiento

  Las estaciones de muestreo son localizadas con el apoyo de un equipo GNSS navegador, y por medio de la aplicación de *Google* mencionada anteriormente. Posteriormente, dichas estaciones fueron situadas con un GNSS bifrecuencia

mediante método RTK protocolo NTRIP, enlazado a la Red Geodésica Nacional de Estaciones de Referencia GNSS (ERGNSS) del IGN, obteniendo precisiones absolutas en el orden de los centímetros (Figura 4.26).

Cabe resaltar que, para poder enlazarse a la red ERGNSS el operador debe registrarse previamente en la página del IGN: http://ergnss.ign.es/gnuserportal/, y mediante los datos de usuario ingresados y debidamente validados, se puede hacer uso de este método, de manera gratuita.

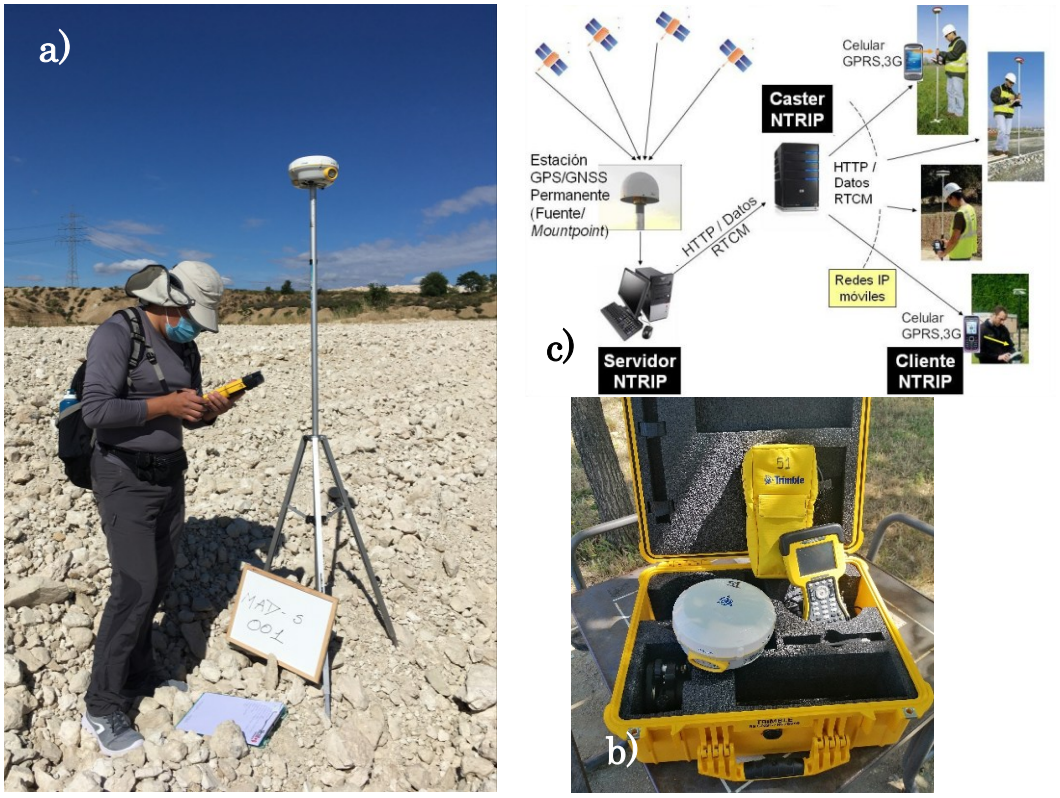


Figura 4.26: Posicionamiento: a) uso GNSS; b) equipo Trimble R4 empleado; c) método RTK protocolo NTRIP.

Fuente: Figura c) tomada de Ivars (2011).

El uso del equipo GNSS L1/L2 radica en la obtención de una buena precisión y exactitud de las estaciones muestrales, siendo de utilidad al momento de relacionar los datos recopilados con los píxeles de las imágenes empleadas, o en el proceso de validación de los resultados obtenidos.

El posicionamiento de las estaciones donde se tomaron muestras de suelo se realizó en el centro de una cruz filial (20 x 20 m), y para el caso de muestras de hojas de cultivo, las coordenadas proceden del centro de una parcela diseñada (60 x 60 m), evitando la pérdida de precisión del equipo GNSS causada por la

presencia de vegetación u otro obstáculo. Los datos levantados fueron desplegados en el *software Trimble Business Center*.

- Recolección de muestras: Suelo
    - Número y disposición de los incrementos muestrales

    Los distintos tipos de partículas presentes en una unidad muestral quedan correctamente representados en la muestra compuesta de 3 incrementos o testigos (de Miguel et al., 2002), los cuales deben ser tomados en el centro y en los extremos de una línea de 1 m de equidistancia al centro, sin embargo, para el presente estudio, y con la finalidad de relacionar este tipo de muestreos con el empleo de imágenes satelitales, esta distancia fue modificada por el tamaño de píxel promedio de Sentinel-2 (20 m) y se tomó como testigos los vecinos más próximos, dando un total de 5 incrementos por cada muestra compuesta.

    Una vez posicionado el centro de la estación se dibujó una cruz griega con dirección N-S, teniendo cada uno de sus brazos una distancia de 20 m, a partir de los cuales se extrajeron los incrementos mediante el empleo de una pala gardena de 33,5 cm de largo y 8 cm de ancho. El peso aproximado de cada testigo fue de 250 g, dando un total de 1250 g de una muestra compuesta, garantizando de esta forma una correcta representación de los distintos tipos de partículas o cúmulos presentes (Figura 4.27).

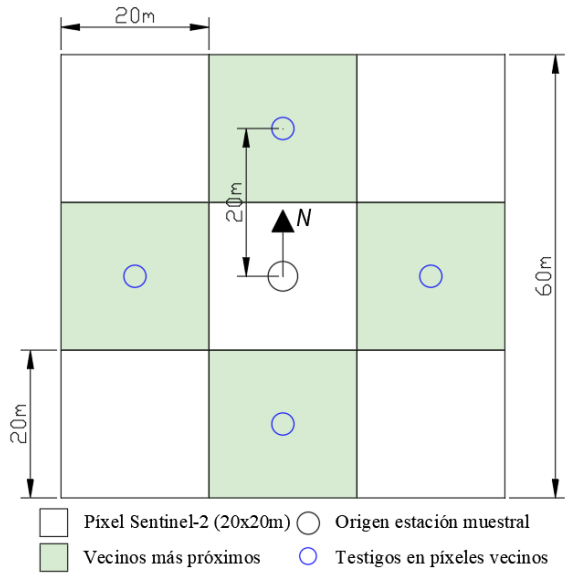


Figura 4.27: Distribución de incrementos para captura de muestra compuesta de suelo.

- Profundidad

La recolección de la muestra de suelo fue de los primeros 20 cm a partir de la superficie, debido a que, en esta capa del suelo existe una mayor tendencia de acumulación de metales pesados, además, es la parte más activa biológicamente, pudiendo los elementos traza ser fácilmente accesibles para los cultivos. Previamente, se retiró los restos vegetales y la maleza que se encuentra en el terreno (IHOBE, 2002; Peris Mendoza, 2006).

- Toma de testigos

Los 5 testigos de un peso aproximado de 1250 g son introducidos en una bolsa de plástico y mezclados manualmente, disgregando los terrones y retirando pedregosidades y restos vegetales que pudieron quedar incluidos (Figura 4.28). De manera general, todas las muestras recolectadas fueron almacenadas en bolsas plásticas, evitando una posible contaminación de las muestras o una injerencia en los resultados de laboratorio (IHOBE, 2002).

Figura 4.28: Almacenamiento de muestras compuestas de suelo en bolsas de plástico.

- Etiquetado de muestras

El etiquetado se caracteriza por la presencia de 3 códigos, el primero describe la provincia en la que se ubica la estación de muestreo (MAD=Madrid y SEV=Sevilla), el segundo describe el tipo de superficie

de muestra recolectada (S=suelo y C=hoja de cultivo), y el tercero representa a la secuencia de las estaciones de muestreo, el cual está en función de su visita (001, 002, etc.). Cada una de las bolsas de plástico fueron etiquetadas con marcador permanente.

- Manejo, limpieza y transporte de los materiales de campo

Entre cada estación muestral se hizo una limpieza de las herramientas con papel absorbente evitando la presencia de adherencias que puedan alterar los resultados de las estaciones posteriores. Al final del día el material empleado para la recolección de muestras fue limpiado con agua. Es recomendable transportar las muestras a una temperatura entre 4 a 6ºC para evitar una afección de las propiedades debido a la actividad microbiológica (IHOBE, 2002).

- Obstáculos

Si la estación de muestreo planificada presenta un obstáculo la misma es desplazada, evitando salir de la superficie homogénea seleccionada. En caso de salir de dicha superficie o de no existir el permiso para el ingreso a las diferentes localidades se procede a descartar la estación de muestreo.

- Recolección de muestras: Hojas de cultivo

La concentración de elementos traza en cultivos varía dependiendo de su disponibilidad en el ambiente, el tipo de plantación, la parte del cultivo a analizar y la edad del mismo (Ernst, 1995). Para tomar muestras de hojas de cultivo se seleccionó una superficie homogénea de dimensiones 60 x 60 m, equivalente a 3 x 3 píxeles de una imagen Sentinel-2, a partir de la cual se extrajeron las hojas de manera aleatoria, obteniendo así una muestra compuesta.

Se optó por capturar las muestras de esta parte de la planta debido a que, la mayor cantidad de energía registrada por sensores ubicados en satélites, proviene de las hojas.

Las muestras fueron recogidas mediante el empleo de tijeras y guantes de vinilo, evitando posibles repercusiones en la salud humana o una alteración de la muestra, posteriormente las hojas fueron agitadas cuidadosamente para eliminar el polvo existente, almacenadas en una bolsa de plástico y etiquetadas como ya se mencionó anteriormente (Alam et al., 2003).

En la Figura 4.29 se puede evidenciar la recolección de muestras realizada tanto en suelo como en vegetación, siguiendo los estándares pertinentes para dicho fin.

Figura 4.29: Toma de muestras de: a) suelo; b) hojas de cultivo.

- Medidas expeditas

Mediante el uso de un termómetro termopar de marca Proster se realizó las medidas de las diferentes superficies muestreadas, pudiendo encontrarse las mismas en estado sólido o líquido. Dichas superficies en ningún caso, dentro de la presente investigación, excedieron el rango de temperatura que mide el termopar (-200ºC a 1372ºC).

Además, mediante el apoyo de una brújula e inclinómetro, se capturaron datos angulares referente al azimut y elevación solar, valores que son empleados para poder obtener, mediante modelos empíricos, datos de reflectividad a partir de imágenes satelitales próximas a las fechas en las que se efectuó la campaña de campo (Figura 4.30).

Figura 4.30: Captura de medidas expeditas.

- Fechas de campañas de campo

Como ya se explicó anteriormente, la primera campaña de campo se la realizó en el PRS, Madrid, el 23 de junio de 2021, posterior a esto, se realizó la segunda campaña de campo en el RG, Sevilla, durante los días 28 de junio al 02 de julio de 2021. Durante la campaña de campo en Sevilla, se reservó el primer día, a la realización de un recorrido previo para evaluar la viabilidad de los puntos planificados a priori. Dentro de España no se realizaron campañas de campo adicionales, debido a los costos asociados, y a la disponibilidad de equipos y tiempo.

c. Ficha de campo

Fue necesario registrar en un estadillo o ficha (Figura 4.31) las características generales del lugar que complementen el trabajo realizado en gabinete y ayuden a comprender el origen de la problemática. A continuación, se describen cada una de las secciones que integran el presente formulario:

- En ubicación se ingresa la información referente a comunidad, provincia, municipio y sector o poblado próximo a la estación de muestreo.
- En el casillero de registro de la observación se ingresa el código de la estación muestral, la fecha de levantamiento, la hora, y el código de las fotografías capturadas, las cuales deben ser al menos 4 por estación muestral: estación muestral con su código, características generales del terreno y/o actividades ejecutadas.

- En el apartado de posicionamiento se ingresan todos los datos relacionados al equipo GNSS. Para el caso del PRS las coordenadas ingresadas poseen el sistema de referencia WGS84 UTM Z30N, y para el RG, WGS84 UTM Z29N.
- Los siguientes parámetros, se encuentran relacionados a las características morfométricas, litológicas y edáficas. En cuanto a la morfometría se ingresa la pendiente local del terreno, obtenida con el apoyo del clinómetro, este dato es útil para analizar los posibles efectos que la escorrentía superficial puede ejercer en el contenido de los metales pesados. Por otro lado, en caso de existir algún afloramiento rocoso, se levanta la descripción del tipo de roca existente, caso contrario se emplea información secundaria, y, por último, se describe la humedad, la presencia o ausencia de elementos en superficie (plástico, latas, restos orgánicos no comunes, etc.) y la pedregosidad existente en el suelo, este último permite evaluar la facilidad al momento de capturar la muestra.
- Para conocer el aprovechamiento actual en cada estación muestral se ha implementado el apartado de uso actual, en caso de seleccionar cultivos, se debe apuntar el tipo de plantación existente y el estado de las hojas del cultivo.
- Es importante analizar los posibles impactos cercanos, por ejemplo, poblados (casas, granjas, hoteles, etc.), vías (autopistas, carreteras, caminos, etc.), industria (cerámicas, metalúrgica, etc.).
- Los siguientes apartados tienen referencia al uso del espectrorradiómetro para el cual es importante conocer el estado de tiempo, teniendo un doble uso, por un lado, permite conocer las condiciones de trabajo, y por otro, esta variable incide de manera directa en la reflectividad de los objetivos. También, se cuenta con un apartado en el cual se registra el nombre de la medida espectral y los tipos de objetivos medidos (in situ o gabinete). Además, se cuenta con un campo para ingreso de las medidas expeditas realizadas.
- Por último, bajo el apartado de observaciones, se puede realizar una descripción pormenorizada de las características de importancia del lugar, las cuales ayuden a un mejor entendimiento de la problemática, y dentro de croquis se realiza un bosquejo de la ubicación de cada estación muestral.

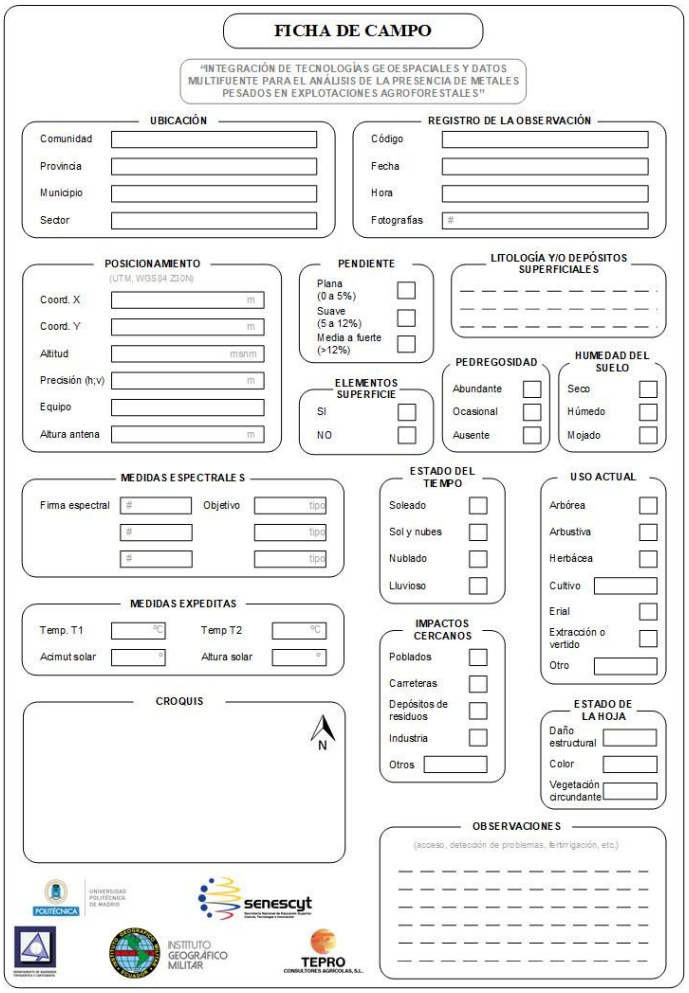


Figura 4.31: Estadillo de campo.

Fuente: Modificado de de Miguel et al. (2002); Peris Mendoza (2006).

Cabe indicar que, todas las fichas de campo levantadas y debidamente llenadas, de las dos áreas test (PRS y RG), se encuentran plasmadas en el Anexo C del presente documento.

4.5.3. Preparación y análisis de muestras

Dentro del presente apartado, se realizó una indagación preliminar de instituciones que poseen equipos para medir firmas espectrales y para realizar analíticas dentro de España (Figura 4.32). Fue de gran importancia para el desarrollo del presente estudio, las colaboraciones prestadas por algunos grupos de investigación de España: GEOINCA, FITOUAM, CIEMAT, Instituto Andaluz de Investigación y Formación Agraria, Pesquera, Alimentaria y de la Producción Ecológica (IFAPA) y CEBAS-CSIC.

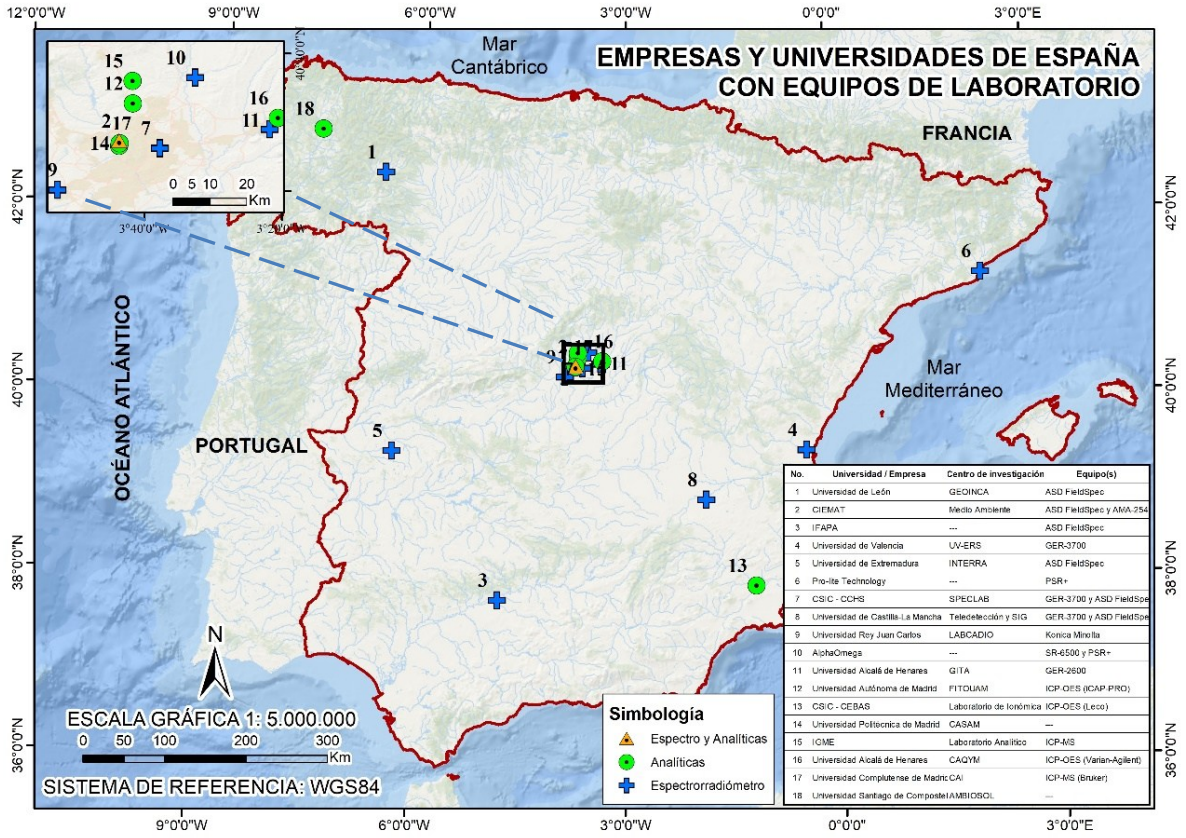


Figura 4.32: Representación geoespacial de empresas y universidades de España que cuentan con equipos de laboratorio.

a. Análisis químico en laboratorio

El centro de investigación FITOUAM cooperó en la elaboración de las analíticas, la cual fue guiada por parte del personal de la Universidad y debidamente sustentada en procesos avalados por la comunidad científica. Adicionalmente, el Departamento de Medio Ambiente del CIEMAT, cooperó en la medición de Hg de las muestras. La presente actividad fue abordada entre los meses de julio y agosto de 2021.

Cada una de las muestras se encuentran debidamente codificadas, en caso de no existir una secuencia en la numeración es debido al impedimento para ingresar a una determinada localidad o a la presencia de obstáculos. Cabe resaltar que, en el PRS se cumplió con el 75% de la planificación de estaciones muestrales realizada, y para el caso del RG fue del 81%. Debido al interés de TEPRO se incrementaron 3 estaciones muestrales en el área test del RG.

- Suelo
    - Preparación física

Las muestras compuestas, almacenadas en bolsas de plástico, fueron secadas a temperatura ambiente, durante el lapso de 3 días. Después de este tiempo las muestras fueron desagregadas manualmente o con el apoyo de un mazo de madera para romper los agregados, y cuarteadas, separando una cantidad aproximada de 125 g, la cual fue cribada con un tamiz de 2 mm de luz. Para esto se seleccionó previamente un orden, en función de las estaciones muestrales con mayor indicio de contaminación (vertederos, canteras, etc.), con la finalidad de evitar posibles focos de polución de las muestras (Figura 4.33).

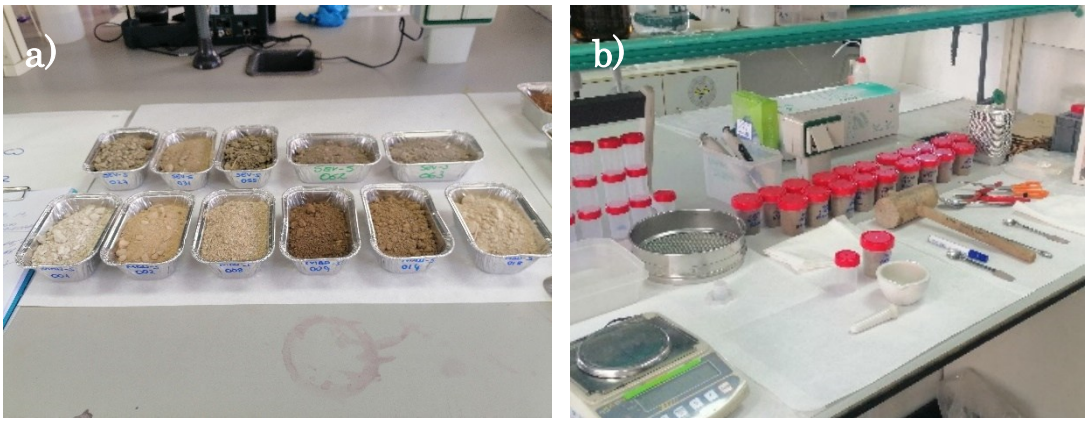


Figura 4.33: Preparación física: a) selección de 125 g para tamizado; b) molido de muestras.

A partir del resultado obtenido se cuarteó la muestra y se recogieron 10 g aproximadamente, los cuales fueron molidos en un mortero de ágata, hasta obtener un diámetro inferior de 0,25 mm, óptimo para la realización de los análisis químicos. El material restante tamizado fue empleado para extraer las propiedades edáficas de los suelos, como: pH (influye en procesos de retención de metales pesados), textura (procesos de adsorción de elementos traza están en función de la composición de la fracción de arcilla) y materia orgánica (clave en los procesos de retención de contaminantes) (de Miguel et al., 2002).

- Análisis edáfico

Los valores de pH y conductividad eléctrica (CE) fueron obtenidos por medida potenciométrica y conductimétrica respectivamente (Figura

4.34), a partir de la suspensión derivada de la agitación del suelo con agua destilada en una determinada relación, para el pH se empleó la relación 1 : 2,5 (4 g suelo : 10 ml agua destilada) y para la conductividad 1 : 5 (3 g : 15 ml) (MAPAMA, 1994).

Por otra parte, para la determinación de las diferentes texturas se empleó un análisis granulométrico cualitativo, específicamente mediante prueba de manipulación según método de la FAO (2021), en función de una secuencia ordenada de pasos: bola > cilindro (≈ 7 cm) > cilindro (≈ 15 cm) > círculo, que para poder realizarlos, la muestra deberá contener una determinada cantidad de limo y arcilla.

Por último, para la obtención de la materia orgánica se empleó el método de pérdida de peso por ignición (550ºC) a partir de una muestra de suelo seca (105ºC), calculado mediante la diferencia de masa antes y después de someter a 550ºC (Margesin & Schinner, 2005).

Figura 4.34: Preparación física para análisis: a) medida pH; b) medida CE.

- Digestión

Existen algunas técnicas que permiten determinar la concentración de metales, una de las más conocidas y la que se empleó en la presente investigación fue la denominada Espectroscopía de Emisión Atómica con Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-OES, por sus siglas en inglés), misma que permite determinar y cuantificar la mayoría de elementos de la tabla periódica (Figura 4.35).

Previo a esto se realizó un proceso de digestión, mediante el cual se libera los metales de la matriz, sometiéndola a temperatura (125ºC) y presión (1,5 bar) constantes, durante 30 minutos. Para esto se empleó 0,5 g de

muestra y se le añadió 6 ml de agua Milli-Q, 6 ml de HNO_3 (65%) y 4 ml H_2O_2 (33%), con el fin de conseguir los contenidos pseudo totales de elementos traza presentes en la muestra compuesta (de Miguel et al., 2002; Lozano-Rodríguez et al., 1995).

El resultado de la digestión fue cribado, mediante papel filtro de 120 mm, en matraz de aforo de 50 ml, y enrazado con agua Milli-Q. Cabe mencionar que, los blancos fueron preparados de forma similar al proceso indicado, sin contenido de suelo alguno. Además, el peso de la muestra exacto fue anotado, ya que es útil para determinar las concentraciones finales de los elementos medidos.

En resumen, se determinaron, mediante ICP-OES, los siguientes elementos tóxicos potenciales: As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn. La obtención de la concentración del elemento tóxico Hg se realizó a través del espectrofotómetro de absorción atómica AMA254 sobre la muestra molida, de manera directa.

Figura 4.35: Digestión y análisis de muestras de suelo: a) digestión en autoclave; b) resultado de digestión filtrado y aforado; c) ICP-OES equipo iCAP-PRO; d) espectrofotómetro AMA254.

- Hojas de cultivo
    - Preparación física

Como primer paso, se lavaron las hojas con agua destilada para eliminar los restos de partículas que pueden estar adheridas. Posteriormente, se trocearon las hojas y colocaron en papel filtro, para luego proceder a secar en un horno a 65ºC durante 3 días. Con el cultivo seco se procedió a pulverizarlo en un micromolino hasta obtener partículas inferiores a 0,5 mm (Figura 4.36).

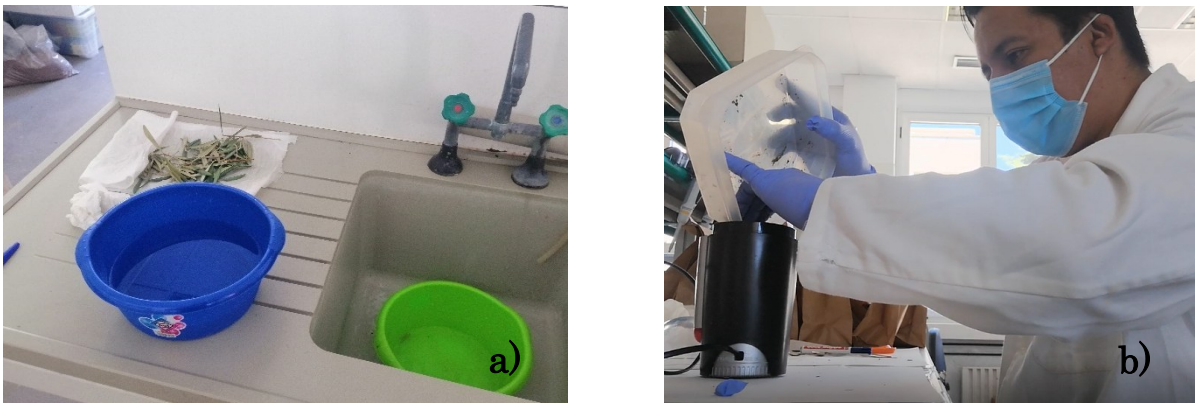


Figura 4.36: Preparación física de cultivos: a) lavado y secado de hojas; b) micromolino Becken para pulverizar las hojas.

- Digestión

De igual forma que para el suelo se seleccionó el método de digestión en autoclave, aceptada en la actualidad y con amplias ventajas en cuanto reducción de tiempos, costos, volumen de reactivos, entre otros (Sandroni & Smith, 2002), y se empleó el método ICP-OES para obtener los contenidos pseudo totales de metales pesados.

Para el caso de las hojas de cultivo pulverizadas se emplearon 0,3 g de muestra (Figura 4.37), se le añadió 4 ml de agua Milli-Q, 1,5 ml de HNO_3 (65%) y 1 ml H_2O_2 (33%), y fueron sometidas a las mismas condiciones de temperatura y presión (Lozano-Rodríguez et al., 1995). El resultado de la digestión fue cribado, mediante papel filtro de 90 mm, en matraz de aforo de 15 ml, y enrazado con agua Milli-Q. Posteriormente, se determinaron, mediante el equipo iCAP-PRO, las concentraciones de los elementos tóxicos: As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn, y mediante espectrofotómetro AMA254 el contenido de Hg.

Figura 4.37: Autoclaves y muestras de cultivo previo a la digestión.

Durante todo este proceso, si algún análisis complementario no fue realizado, ya sea edáfico, o para obtener las concentraciones pseudo totales de metales pesados, es porque implicaba un mayor gasto en cuanto a tiempo y dinero en la fase de laboratorio, y su aporte es mínimo en la consecución de los objetivos del presente estudio.

b. Firmas espectrales en gabinete y campo

El grupo de investigación GEOINCA de la Universidad de León (Campus Ponferrada) cooperó en la obtención de las firmas espectrales, poniendo a disposición personal, equipos, materiales, hardware y software necesarios para la captura de espectros en gabinete. La presente actividad fue abordada el mes de agosto de 2021.

Adicionalmente, el IFAPA cooperó con un espectrorradiómetro ASD FieldSpec3 para tomar medidas en la campaña de campo realizada en Sevilla, cabe indicar que, no se contó desde un inicio con el equipo, por ende, se levantaron firmas espectrales en estaciones muestrales puntuales, sin embargo, esta actividad permitió adquirir una mejor destreza en la manipulación del mismo.

Las firmas espectrales en gabinete se obtuvieron de las muestras tamizadas (Ø < 2 mm) y trituradas (Ø < 0,25 mm), además de las muestras de hojas de cultivo molidas (Ø < 0,5 mm), empleando un espectroradiómetro ASD FieldSpec4, el cual interactúa mediante wifi con el hardware. El principio fundamental es la captura del valor de reflectividad de las diferentes muestras (debidamente etiquetadas), en el rango espectral de 350 a 2500 nm. Cabe mencionar que, el equipo debe

permanecer encendido al menos 1 hora, para que los sensores internos se estabilicen (Malvern Panalytical, 2015).

Se pusieron las muestras en recipientes de color negro, evitando de esta forma que la reflectividad de la muestra per se, se vea afectada, además, se emplearon 2 lámparas (marca ASD) para alumbrar el objetivo, con distancia angular apropiada, impidiendo la generación de sombras, y, la fibra óptica, con ángulo de visión de 25º, fue colocada a una altura de ≈ 9 cm, haciendo que el área enfocada sea un círculo de ≈ 2 cm de radio, asegurando con esto que la reflectividad de otros objetivos no se incorporen a la firma espectral (Figura 4.38).

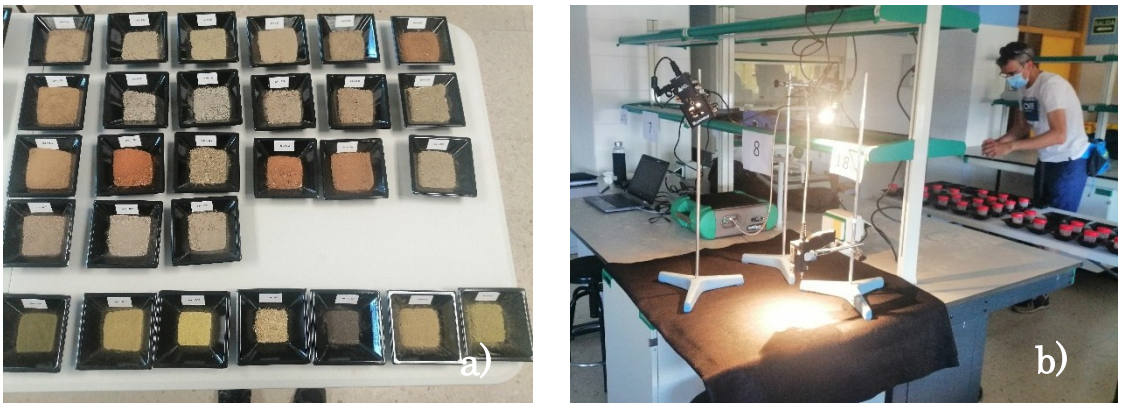


Figura 4.38: Captura de firmas: a) recipientes color negro; b) montaje de los equipos.

En el *software* RS3 se configuraron las rutas de almacenamiento y se habilitó la opción de promedio múltiple de las firmas espectrales para un mismo objetivo. En torno a los 1000 y 1800 nm se genera un salto en la firma espectral, debido al cambio interno de sensor, lo cual puede ser corregido durante el posproceso.

Previo a la captura de firmas se realiza una optimización empleando el blanco, marca Spectralon, a partir del cual se obtiene valores altos de reflectividad difusa (93% y 99% según la longitud de onda), mostrando en el eje de las abscisas las bandas espectrales y en las ordenadas los números digitales, y, se ejecuta un *white reference*, llevando dichos números a valores de reflectancia relativa, como se evidencia en la Figura 4.39 (Schmid, 2021).

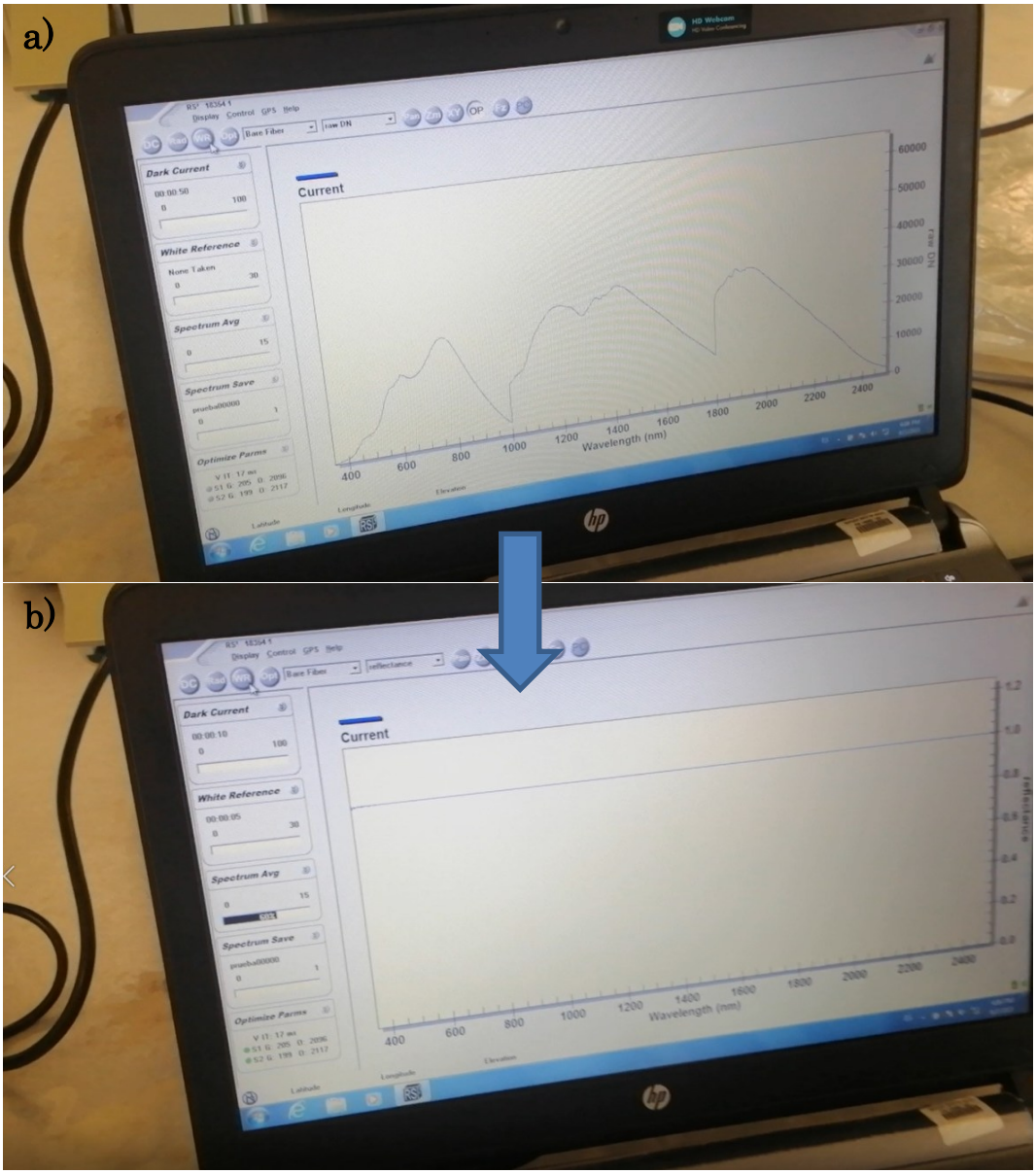


Figura 4.39: Firmas espectrales del blanco: a) optimización; b) *white reference*.

A partir de esto se puede empezar a capturar las firmas espectrales de las muestras, para lo cual se realizaron 4 réplicas por cada muestra, girando 90º el recipiente. Se debe procurar que la superficie del material ubicado en el recipiente, se encuentre debidamente alisada y no se evidencie abultamientos, para esto se puede emplear un cuchillo o una espátula.

Como se indicó anteriormente, en algunas estaciones muestrales de la campaña de campo de Sevilla, se pudieron tomar firmas espectrales de suelo in situ, capturando las reflectividades absolutas en cada uno de los incrementos muestrales de ciertas estaciones (Figura 4.40). En cuanto a las hojas de cultivos no se pudieron capturar

firmas espectrales debido a que no se contaba con la infraestructura adecuada para adquirir datos desde la parte superior de la planta.

Figura 4.40: Manejo de espectrorradiómetro ASD FieldSpec3 en campaña de campo.

4.5.4. Resultados de estaciones muestrales

a. Análisis químico en laboratorio

El equipo iCAP-PRO emplea el *software* Qtegra para recolección y visualización de datos (Figura 4.41). En dicha herramienta se ingresan las especificaciones del proyecto mediante la creación de LabBooks, detallando principalmente: nombre del proyecto, posición de las muestras y de los blancos, elementos químicos a ser medidos y su correspondiente longitud de onda (por ejemplo, As con una λ = 189,042 μm), y el tipo de medida a ser realizado dentro de la cámara de plasma (axial o radial) (Thermo Fisher, 2021).

Adicionalmente, el correcto avance del LabBook generado se lo verifica mediante las medidas realizadas del patrón de control interno (Ytrio). En casos donde la concentración de un elemento es mayor a los patrones empleados, es necesario realizar diluciones.

El resultado obtenido a partir del equipo se encuentra en mg/l, y para poder ser transformado a mg/kg, se debe multiplicar por el contenido de matraz de aforo (suelos 50 ml y hojas de cultivo 15 ml), y dividir para el peso de la muestra previo a la digestión (suelos ≈ 0,5 g y hojas de cultivo ≈ 0,3 g).

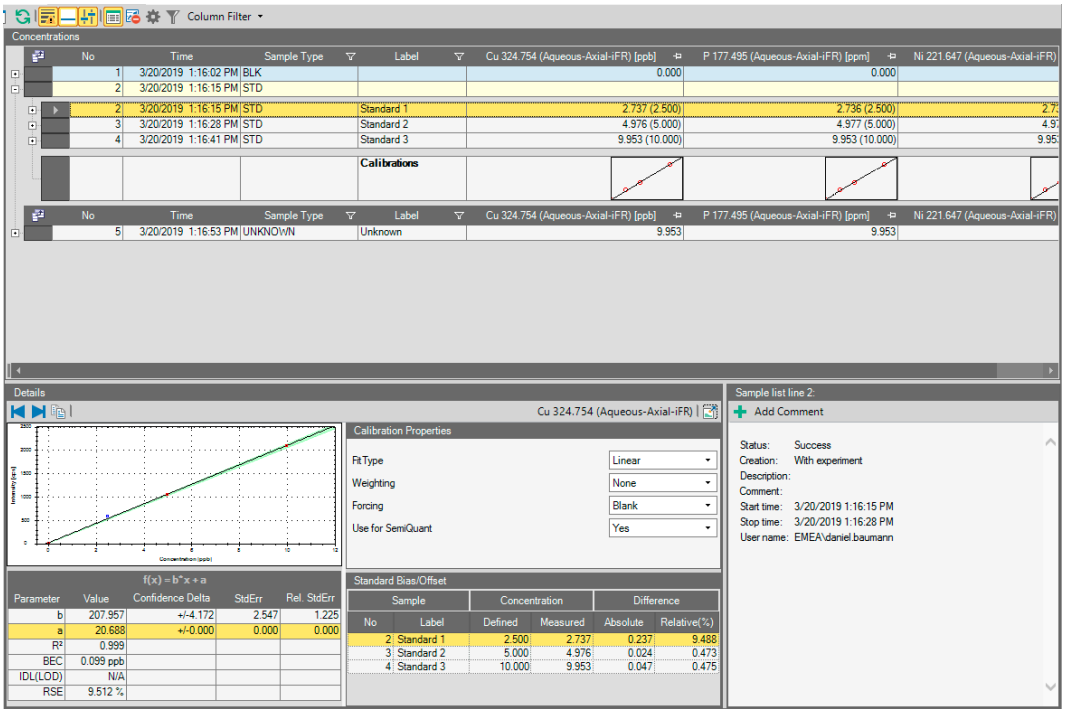


Figura 4.41: Medición de patrones en Qtegra.

Cabe mencionar que, en el iCAP-PRO no se puede realizar medidas de concentración de Hg, debido a que, se necesita un equipo dedicado únicamente para dicho fin, por la contaminación que genera el metal, por ende, se empleó el espectrofotómetro AMA254 del CIEMAT, al cual se le ingresa la muestra molida y mediante el *software* AMA se obtiene directamente el resultado de Hg en mg/kg (Figura 4.42) (CSIC, 2018).

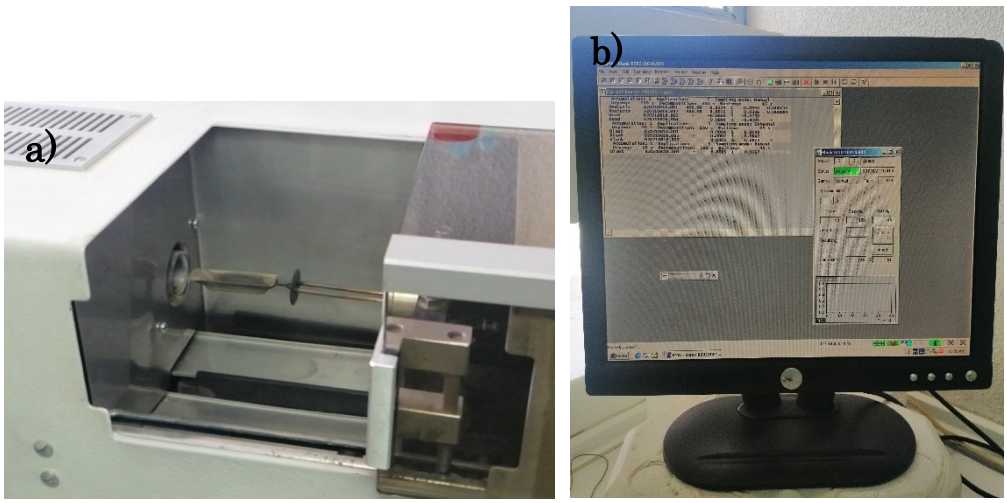


Figura 4.42: AMA254: a) ingreso de muestra molida; b) resultados obtenidos.

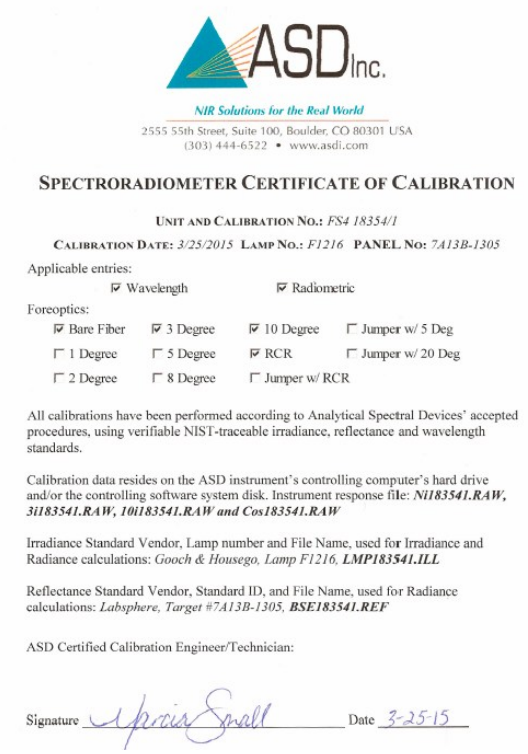
Tanto en el iCAP-PRO como en el AMA254, se realizaron 3 medidas por cada una de las muestras, permitiendo de esta forma ir verificando los resultados, los cuales deben estar acorde a las concentraciones de los patrones ingresados inicialmente.

Las réplicas en el proceso de muestreo permiten cuantificar la variabilidad introducida en los resultados ya sea en la toma de muestras como en los procesos de preparación y análisis, sin embargo, para el presente estudio, debido a la finalidad del mismo y al costo que trae consigo su estimación, el estudio carece de este proceso.

Los resultados obtenidos de las analíticas, conjuntamente con las pruebas edáficas se encuentran en el Anexo D del presente documento.

b. Firmas espectrales en gabinete

Como se manifestó anteriormente, para la adquisición de las firmas espectrales de las muestras en gabinete se utilizó el equipo ASD FieldSpec4, del grupo GEOINCA, el cual ha sido calibrado en el año 2015 por ASD Inc. (Figura 4.43).



ASD Inc.

NIR Solutions for the Real World

2555 55th Street, Suite 100, Boulder, CO 80301 USA
(303) 444-6522 • www.asdi.com

SPECTRORADIOMETER CERTIFICATE OF CALIBRATION

UNIT AND CALIBRATION NO.: *FS4 18354/1*

CALIBRATION DATE: *3/25/2015* **LAMP NO.:** *F1216* **PANEL NO:** *7A13B-1305*

Applicable entries:

☑ Wavelength ☑ Radiometric

Foreoptics:

☑ Bare Fiber	☑ 3 Degree	☑ 10 Degree	☐ Jumper w/ 5 Deg
☐ 1 Degree	☐ 5 Degree	☑ RCR	☐ Jumper w/ 20 Deg
☐ 2 Degree	☐ 8 Degree	☐ Jumper w/ RCR	

All calibrations have been performed according to Analytical Spectral Devices' accepted procedures, using verifiable NIST-traceable irradiance, reflectance and wavelength standards.

Calibration data resides on the ASD instrument's controlling computer's hard drive and/or the controlling software system disk. Instrument response file: ***Ni183541.RAW, 3i183541.RAW, 10i183541.RAW and Cos183541.RAW***

Irradiance Standard Vendor, Lamp number and File Name, used for Irradiance and Radiance calculations: *Gooch & Housego, Lamp F1216,* ***LMP183541.ILL***

Reflectance Standard Vendor, Standard ID, and File Name, used for Radiance calculations: *Labsphere, Target #7A13B-1305,* ***BSE183541.REF***

ASD Certified Calibration Engineer/Technician:

Signature Patricia Small Date 3-25-15

Figura 4.43: Certificado de calibración de equipo ASD FieldSpec4.

Los estadillos empleados para levantamiento de firmas espectrales se encuentran incorporados en el Anexo E del presente documento, en donde se detalla el operador

del equipo, la hora de inicio y fin de la actividad, el código de las medidas espectrales realizadas, entre otros aspectos.

Posteriormente, se pondrá de manifiesto las correcciones realizadas a las firmas espectrales mediante *software* especializado (Unscrambler, ASD, etc.), y haciendo uso de los ficheros en formato *.asc.

4.6. Implementación de técnicas espectrométricas

4.6.1. Caracterización espectral y selección de bandas diagnóstico

Previo a la caracterización per se, y basándonos en las normativas especificadas en el capítulo 2, existen máximos permisibles de metales pesados, bajo distintos enfoques: aire, agua, uso de suelo y productos alimenticios, siendo estos dos últimos los más importantes para la presente investigación. En la Tabla 4.12, se presenta un resumen de dichos límites.

Tabla 4.12: Resumen de concentraciones máximas permisibles bajo diferentes enfoques.

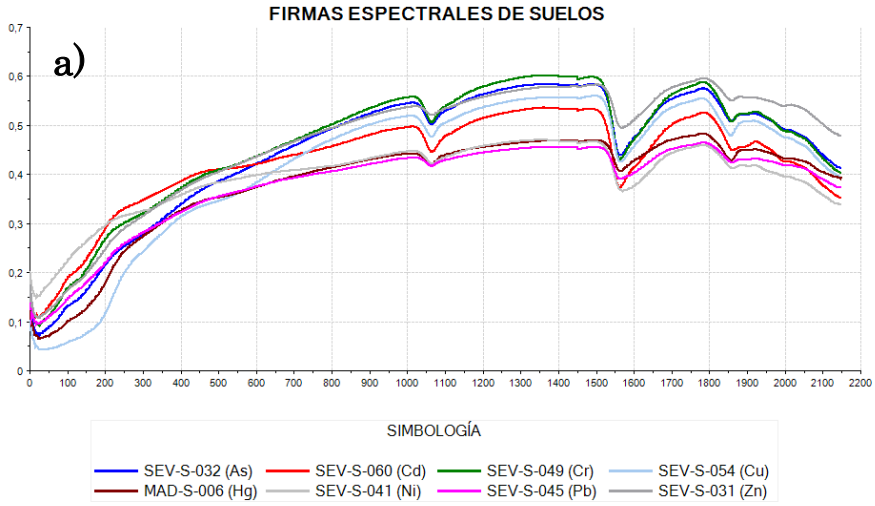
Metal	Agua potable (mg/l)	Aire (µg/m3)	Ingesta seres humanos	Alimentos (mg/kg)	Suelos (mg/kg)
As	0,05	0,01	15,0 [1]	0,2	12,0
Cd	0,003	0,001	25,0 [2]	0,04	0,22
Cr	0,05	100,0	0,3 [3]	---	32,0
Cu	1,0	0,01	0,5 [3]	---	20,0
Hg	0,001	0,01	4,0 [1]	0,05	0,065
Ni	0,02	0,002	13,0 [4]	---	21,0
Pb	0,002	1,0	0,025 [5]	0,1	30,0
Zn	5,0	---	0,3 [3]	---	73,0

[1] µg/kg bw/week; [2] µg/kg bw/month; [3] mg/kg bw/day; [4] µg/kg bw/day; [5] mg/kg bw/week

Como se mencionó anteriormente, debido a la finalidad de la investigación, se priorizaron los usos de suelo y los productos alimenticios, dentro de los usos de suelo se tomó como referencia, en su gran mayoría, los niveles propuestos por la Comunidad de Madrid, y para los productos alimenticios se optó por seleccionar el límite menor entre cereales, hortalizas y legumbres, en función de la normativa de la Unión Europea y del CODEX alimentario.

Posteriormente se estructuró toda la información recopilada en campo y laboratorio, en una misma base de datos, a partir de la cual se realizó una selección múltiple de las estaciones muestrales. La primera selección radica en separar aquellas estaciones muestrales con valores superiores a los límites permisibles por cada metal pesado. La segunda selección es diferenciadora, procurando que en una estación muestral incida tan solo un metal pesado, y el resto de concentraciones de metales pesados se encuentran por debajo de los límites permisibles, por lo general la estación muestral seleccionada no posee la concentración más alta del metal en cuestión. Por último, se seleccionaron las estaciones muestrales con las concentraciones menores obtenidas por cada metal pesado.

A continuación, se representan las firmas espectrales de las estaciones muestrales resultantes de la selección múltiple, con las cuales se realizó el proceso de caracterización para cada uno de los metales pesados (Figura 4.44).



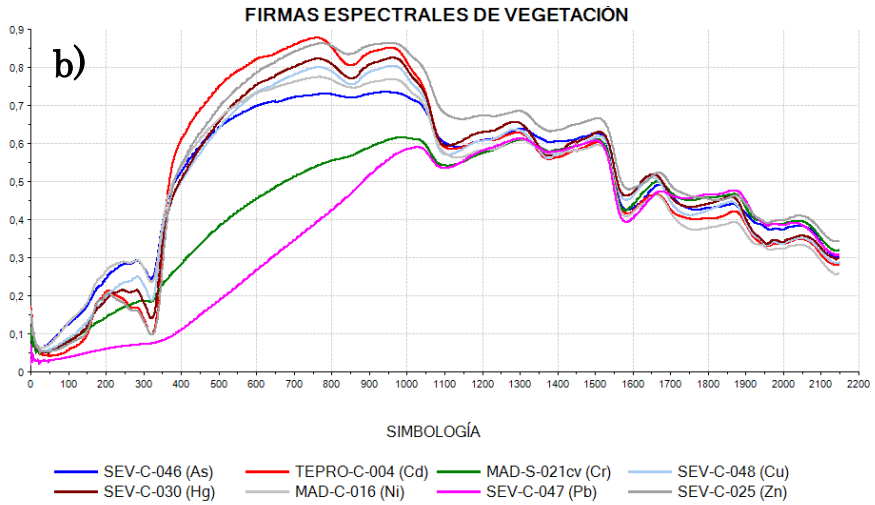


Figura 4.44: Firmas espectrales de estaciones seleccionadas: a) suelo; b) vegetación.

Como se puede evidenciar en la Figura 4.44, existe una alta similitud entre las firmas espectrales de las estaciones muestrales, esto se debe a que, cuando se trabaja con mezcla de materiales, la respuesta espectral de los elementos traza suele ser poco distintiva para su detección, por ende, para poder seleccionar aquellas longitudes de onda en donde cada metal pesado tiene injerencia, se emplean transformaciones, por ejemplo: 1ª derivada, 2ª derivada, etc. (Figura 4.45), las cuales, además de resaltar la presencia de elementos traza, optimizan los datos de reflectividad, eliminando el ruido debido al instrumento y/o al medio (Wang, F. et al., 2018). La ejecución de estas transformaciones fue realizada con el *software Unscrambler*.

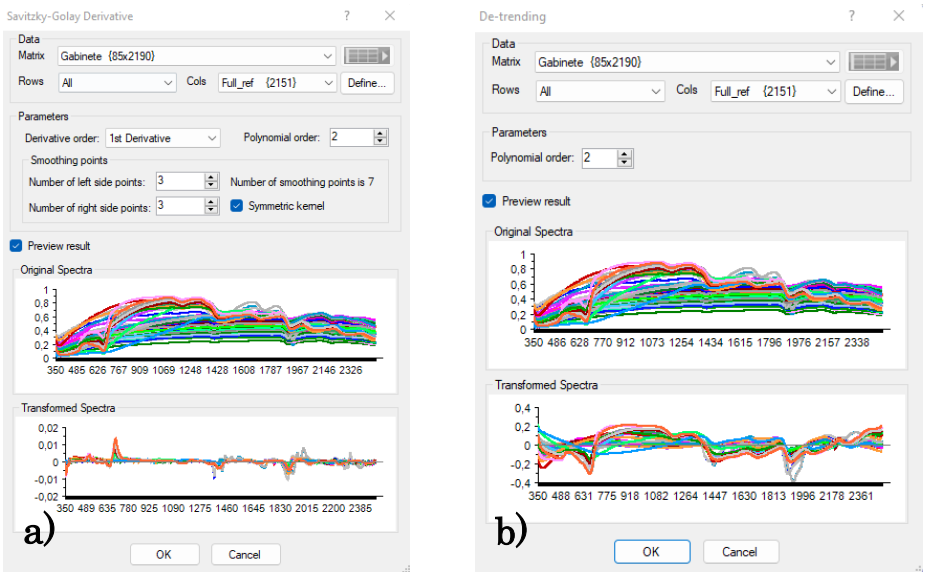


Figura 4.45: Transformaciones: a) 1ª derivada; b) eliminación de tendencia.

Complementariamente, se realizaron correlaciones entre las firmas espectrales (base y transformadas) versus las analíticas obtenidas, a partir de las cuales se seleccionaron longitudes de onda con alta correlación (positiva o negativa) entre ambos conjuntos de datos.

Cabe indicar que, previo a la selección de longitudes de onda, se excluyeron las bandas espectrales inferiores a los 400 nm y superiores a los 2.450 nm, debido a la presencia de variaciones bruscas de la señal, como lo recomienda Gholizadeh et al. (2015); Sun et al. (2017).

El proceso de caracterización y selección de bandas fue contrastado con las firmas de las bibliotecas espectrales, de aquellos minerales con alto contenido de metales pesados y sus respectivas transformadas. Esta confrontación se realizó con la finalidad de discriminar que las longitudes de onda seleccionadas no sean producto de la mezcla de materiales sino de los elementos traza per se (Figura 4.46).

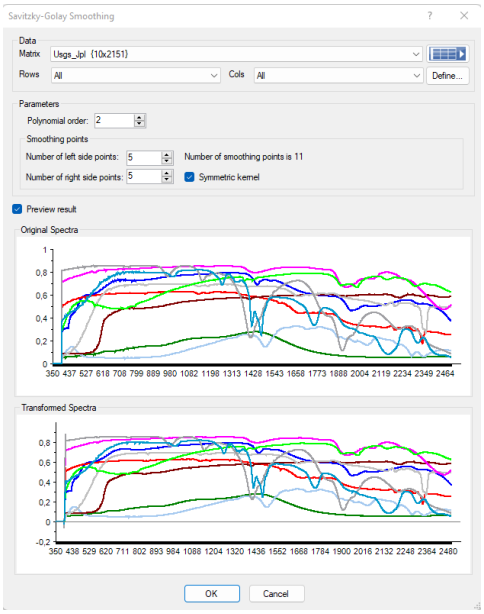


Figura 4.46: Transformaciones aplicadas a los espectros puros.

A manera de ejemplo, fueron comparadas las firmas espectrales de la estación muestral SEV-S-062 (Figura 4.47), la firma de color rojo representa al suelo compuesto triturado, la de color azul al suelo compuesto tamizado, ambas capturadas en laboratorio, y la de color verde corresponde a la firma obtenida in situ. Se evidencia una reducción de 0,1 puntos en reflectividad entre suelos tamizados y triturados, siendo menor los primeros, y de 0,15 puntos en relación

con la reflectividad del suelo obtenido en campo, replicándose este fenómeno en el resto de estaciones muestrales.

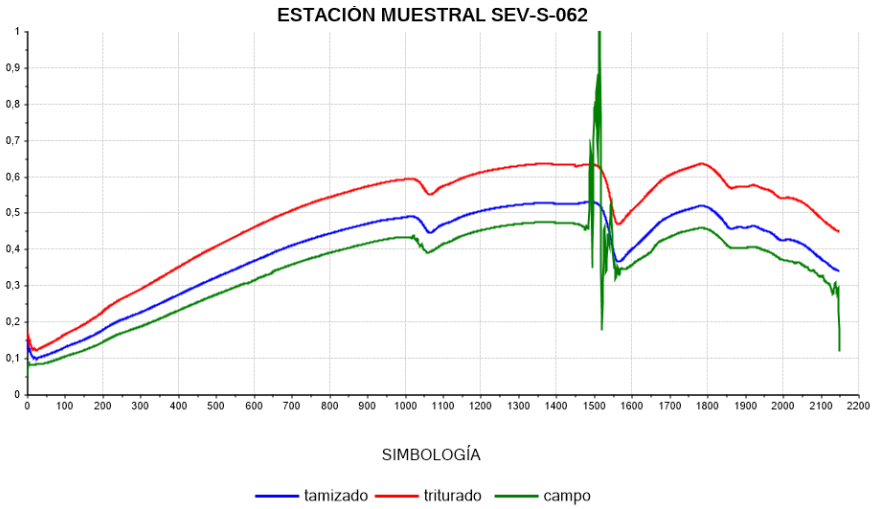


Figura 4.47: Firmas espectrales (campo y laboratorio) de la estación muestral SEV-S-62.

Como se puede evidenciar en la Figura 4.47, la firma espectral levantada en campo presenta dos rangos de longitudes de onda en donde la energía electromagnética es afectada por fenómenos atmosféricos, los cuales son: 1.365 a 1.410 nm y 1.825 a 1.925 nm.

Se debe tener en cuenta que, las respuestas espectrales varían debido al medio en el que han sido capturadas, siendo un ambiente más estable las condiciones de laboratorio en términos de temperatura, iluminación y humedad, y, por otro lado, dicha variación también puede ser originada por el tamaño de grano y la rugosidad (Kim et al., 2020; Shi et al., 2014). Múltiples son los estudios donde emplean suelos tamizados (Ø < 2 mm) para la obtención de firmas espectrales, por ejemplo: Liu et al. (2018); Schmid et al. (2016); Serrano et al. (2020), sin embargo, para evitar errores analíticos por el grano del material, se trabajó con las firmas espectrales de los suelos triturados (Ø < 0,25 mm), como recomienda: Shin et al. (2020); Wu et al. (2005). En cuanto a la vegetación se trabajó con las muestras molidas.

A continuación, se presenta el proceso de caracterización realizado y la selección de bandas espectrales, a partir de las firmas base y de sus respectivas transformadas, para cada uno de los metales pesados.

a. As

Las longitudes de onda alrededor de los 460, 1.400, 1.900 y 2.200 nm son consideradas como las mejores para estudios de As y Cu, sobre todo en áreas mineras (Ren et al., 2009), en cambio las bandas más sensibles para detectar As, Pb, Zn y Cu en hojas de arroz se encuentra alrededor de los 460, 560, 660 y 1.100 nm (Ren et al., 2010).

Las estaciones muestrales con código SEV-S-032 (firma de color azul) y SEV-C-046 (firma de color rojo), correspondientes a suelo y vegetación (arroz) respectivamente, fueron empleadas en el proceso de caracterización espectral del As, conjuntamente con la firma del mineral Escorodita (firma de color verde) (Figura 4.48).

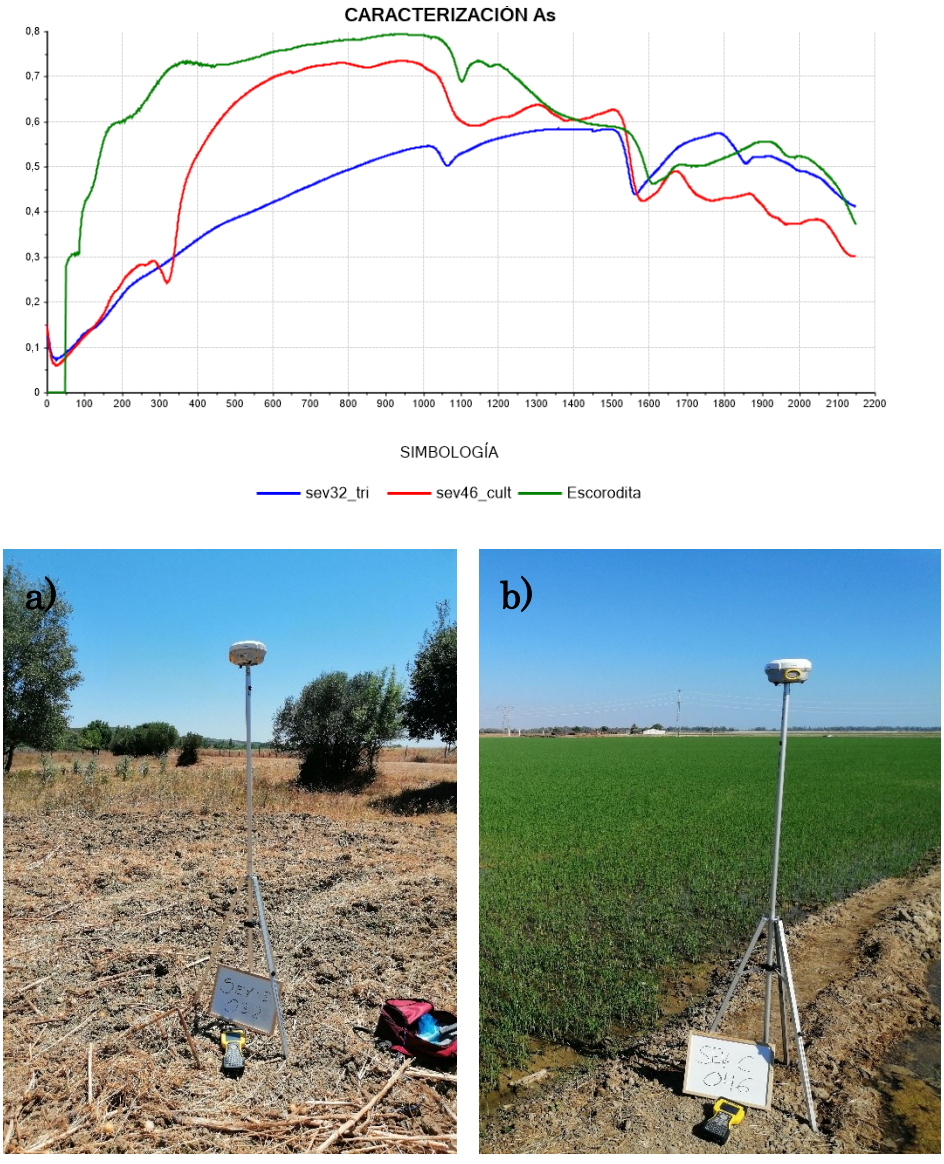


Figura 4.48: Firmas espectrales de suelo y vegetación para caracterización de As y sus correspondientes fotografías en campo: a) suelo; b) vegetación (arroz).

En la Figura 4.49 se presenta una comparativa entre las firmas espectrales de las estaciones muestrales con mayor concentración de As (SEV-S-055, firma de color rojo), menor concentración de As (SEV-S-062, firma de color verde), y la estación seleccionada con contenido de As por encima del límite permisible (SEV-S-032, firma de color azul). Se puede evidenciar que a mayor contenido de As la reflectividad disminuye, siendo 0,05 puntos más bajo la SEV-S-032 en comparación a la SEV-S-062, existiendo un mayor pronunciamiento en los 2.189 nm. Cabe mencionar que, la textura de los suelos mencionados es similar en las 3 estaciones (franco arcillo arenoso).

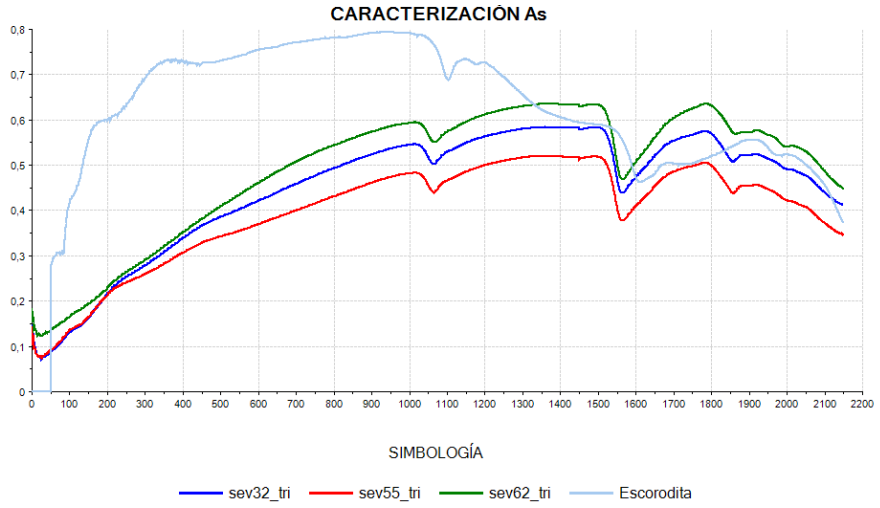


Figura 4.49: Firmas espectrales de suelo con diferente contenido de As.

Las firmas espectrales base de las estaciones muestrales indicadas anteriormente, fueron comparadas con la firma del mineral Escorodita, con la finalidad de extraer aquellas bandas absortivas-reflectivas con alta similitud, obteniendo como resultado la Tabla 4.13.

Tabla 4.13: Caracterización de As a partir de las firmas espectrales base.

Firma espectral	Tipo	λ (nm) central	Ancho (nm)	Profundidad (Δ Reflectividad)	Simetría
SEV-S-032 _ tri (SUELO)	Reflectivo	1365*	1195-1407	ρ_1 = 0,54582 ρ_2 = 0,50713 ρ_1-ρ_2 = 0,03869	Asimetría –
	Absortivo	1414**	1387-1441	ρ_1 = 0,53613 ρ_2 = 0,50161 ρ_1-ρ_2 = 0,03452	Simétrica
	Absortivo	1914**	1868-2034	ρ_1 = 0,57437 ρ_2 = 0,43854 ρ_1-ρ_2 = 0,13583	Asimetría +
	Reflectivo	2267*	2212-2316	ρ_1 = 0,52348	Asimetría +

Firma espectral	Tipo	λ (nm) central	Ancho (nm)	Profundidad (Δ Reflectividad)	Simetría
				ρ_2 = 0,50838 ρ_1-ρ_2 = 0,01510	
SEV-C-046 (VEGETACIÓN)	Reflectivo	1296*	1214-1351	ρ_1 = 0,73438 ρ_2 = 0,72092 ρ_1-ρ_2 = 0,01346	Simétrica
	Absortivo	1492**	1447-1531	ρ_1 = 0,60330 ρ_2 = 0,59062 ρ_1-ρ_2 = 0,01268	Asimetría +
	Absortivo	1935**	1905-2010	ρ_1 = 0,48711 ρ_2 = 0,42416 ρ_1-ρ_2 = 0,06295	Asimetría +
	Reflectivo	2021*	1656-2073	ρ_1 = 0,49021 ρ_2 = 0,44015 ρ_1-ρ_2 = 0,05006	Simétrica
	Reflectivo	2218**	2168-2232	ρ_1 = 0,44034 ρ_2 = 0,43133 ρ_1-ρ_2 = 0,00901	Asimetría -
	Absortivo	2315*	2292-2365	ρ_1 = 0,38529 ρ_2 = 0,37226 ρ_1-ρ_2 = 0,01303	Asimetría +
	Reflectivo	2396**	2348-2423	ρ_1 = 0,38376 ρ_2 = 0,37301 ρ_1-ρ_2 = 0,01075	Asimetría -

*Banda con alto contraste espectral y desplazamiento menor a 20 nm referente al espectro puro;
**Bandas con alto contraste espectral y desplazamiento entre 20 a 50 nm referente al espectro puro

A manera de ejemplo, la Figura 4.50 presenta una comparativa entre la 1ª derivada obtenida de la firma espectral del suelo triturado (firma de color azul) versus la 1ª derivada de la Escorodita (firma de color rojo), permitiendo de esta forma la extracción de bandas espectrales de interés (Tabla 4.14).

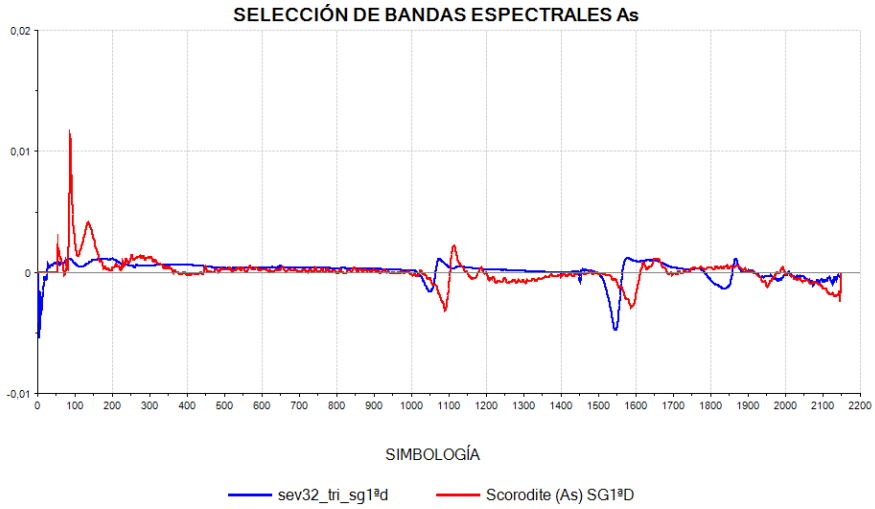


Figura 4.50: Contraste de la 1ª derivada de la firma espectral de suelo triturado (SEV-S-032) con la 1ª derivada de la Escorodita.

Tabla 4.14: Selección de bandas espectrales sensibles al contenido de As a partir de las transformaciones de las firmas espectrales.

Tipo	Suelo (SEV-S-032 _ tri)		Vegetación (SEV-C-046)	
	λ (nm) - Pico	λ (nm) - Valle	λ (nm) - Pico	λ (nm) - Valle
Detrend	---	405**	564**	1485**
	453**	480**	---	1725**
	---	1415**	1862*	1930**
	1844**	1914**	2030*	2273**
	2280*	2345**	2424**	---
	2375*	---	---	---
1ª derivada	434*	463*	514**	1414**
	---	1401**	---	1899**
	1424**	1896**	1980*	2258**
	1926**	2330**	---	---
	2358*	---	---	---
2ª derivada	1414**	1887**	---	1394**
	1908**	---	1429**	1884**
	---	---	1912**	---

*Banda con alto contraste espectral y desplazamiento menor a 20 nm referente a las transformadas; **Bandas con alto contraste espectral y desplazamiento entre 20 a 50 nm referente a las transformadas

En cuanto a la selección de bandas espectrales a partir de las correlaciones realizadas: "As_tri-cor" -> correlación con firma espectral y "As_tri_sg1ªD-cor" -> correlación con 1ª derivada, se puede mencionar que la vegetación presenta valores altos (positivos y negativos) de correlación con respecto a las analíticas, en diferentes porciones del espectro electromagnético, caso contrario sucede con el suelo, evidenciando valores bajos de correlación (Figura 4.51 y Tabla 4.15). Es de importancia destacar que, la correlación existente entre las analíticas y la 2ª derivada presenta una alta variabilidad a lo largo del espectro, sucediendo esto en todos los casos de estudio.

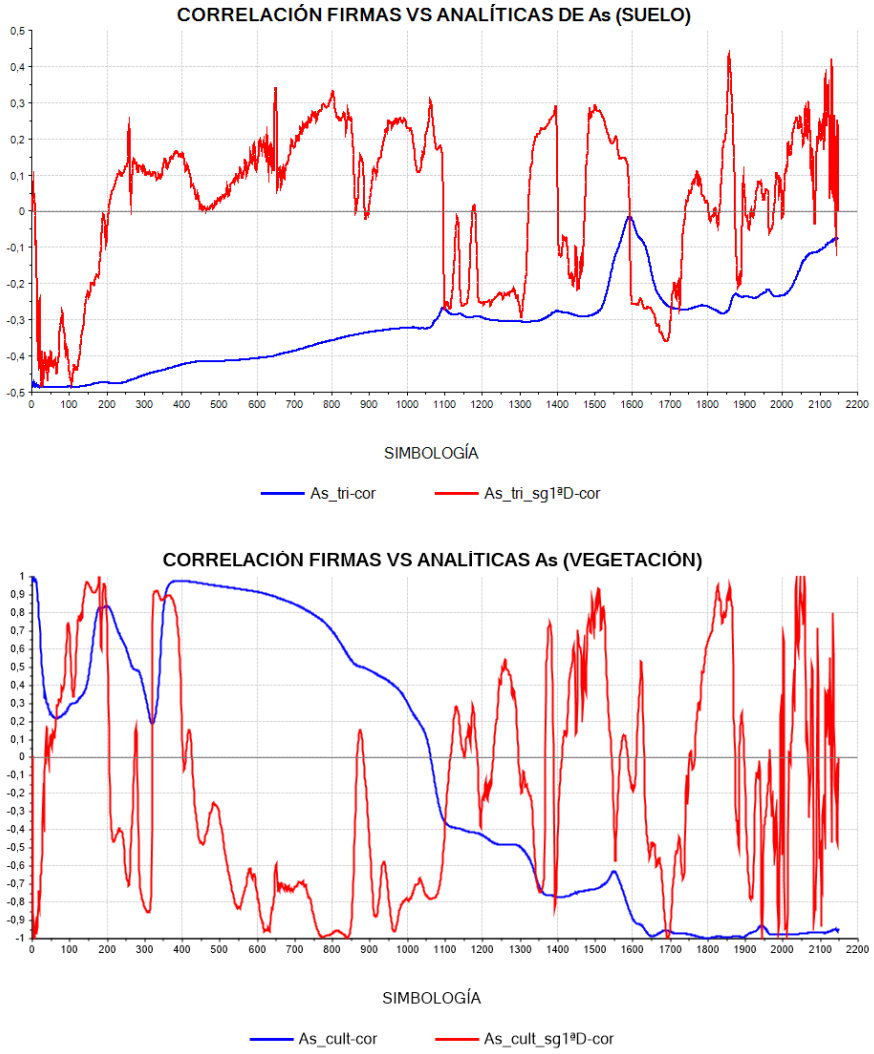


Figura 4.51: Correlación de firmas vs analíticas suelo (superior) y vegetación (inferior).

Tabla 4.15: Selección de longitudes de onda sensibles al contenido de As empleando la correlación entre firmas espectrales y analíticas.

Tipo	Suelo (triturado)		Vegetación	
	λ (nm)	%	λ (nm)	%
Base	423	-48,8	743	97,6
	574	-47,7	2147	-99,9
1ª derivada	458	-47,1	530	99,7
	2040	-36,1	1190	-99,9
	2208	43,8	2044	-99,9
	---	---	2408	99,8
2ª derivada	607	46,4	484	99,9
	708	-49,9	807	99,7
	796	-54,0	1487	-99,8
	2217	-50,2	1725	99,8

Tipo	Suelo (triturado)		Vegetación	
	λ (nm)	%	λ (nm)	%
	2243	49,1	2027	-99,7
	2363	48,7	2095	-99,6

b. Cd

Wang et al. (2018) menciona que, las bandas espectrales sensitivas al Cd se encuentran ubicadas en el borde amarillo, infrarrojo cercano (700 a 900 nm) e infrarrojo lejano, presentando una alta correlación entre el contenido de Cd en suelo versus la primera derivada de la firma espectral. Para el caso de la vegetación, dichas bandas se encuentran distribuidas entre los 690 y 1.300 nm, siendo la longitud de onda óptima los 782 nm (Gu et al., 2015), por otro lado, Feng et al. (2019) indican que, la mayoría de longitudes de onda sensitivas al Cd se encuentran en la región del visible (380 a 780 nm).

A continuación (Figura 4.52), se presenta la firma espectral del Cianuro de Cadmio y Potasio (firma de color verde) proveniente de los datos de la USGS, comparada con las estaciones muestrales SEV-S-060 (suelo -> firma de color azul) y TEPRO-C-004 (vegetación – almendro -> firma de color rojo), a partir de las cuales se realizó el proceso de caracterización de este elemento traza.

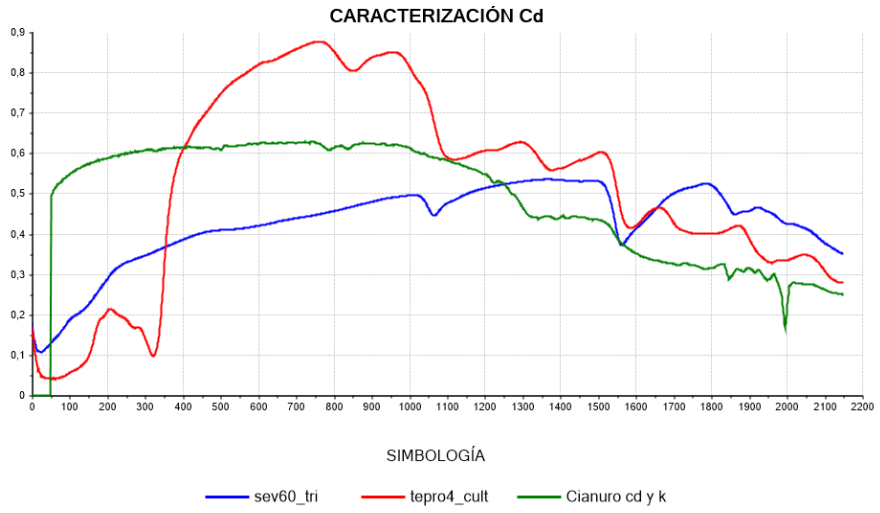


Figura 4.52: Firmas espectrales de suelo y vegetación para caracterización de Cd y sus correspondientes fotografías en campo: a) suelo; b) vegetación (almendro).

La estación muestral con menor contenido de Cd es MAD-S-008 (0,05 ppm), firma de color azul, la estación con mayor cantidad de Cd es la SEV-S-026 (0,76 ppm), firma de color rojo, y aquella seleccionada para la caracterización es la SEV-S-060 (0,51 ppm), firma de color verde, se encuentran representadas en la Figura 4.53, donde se puede evidenciar que el primer tipo de suelo en comparación a la estación SEV-S-060 presenta una diferencia en reflectividad de 0,1 a lo largo del espectro analizado, en cambio, con respecto a la estación SEV-S-026, a partir de los 1.300 nm la diferencia es relativamente pequeña, pudiendo deberse esto al tipo de suelo, el cual varía de arenoso (MAD-S-008) a franco arcilloso (SEV-S-060). Cabe mencionar que, las estaciones SEV-S-026 y SEV-S-060 se encuentran por encima del máximo permisible de Cd en suelo (0,22 ppm).

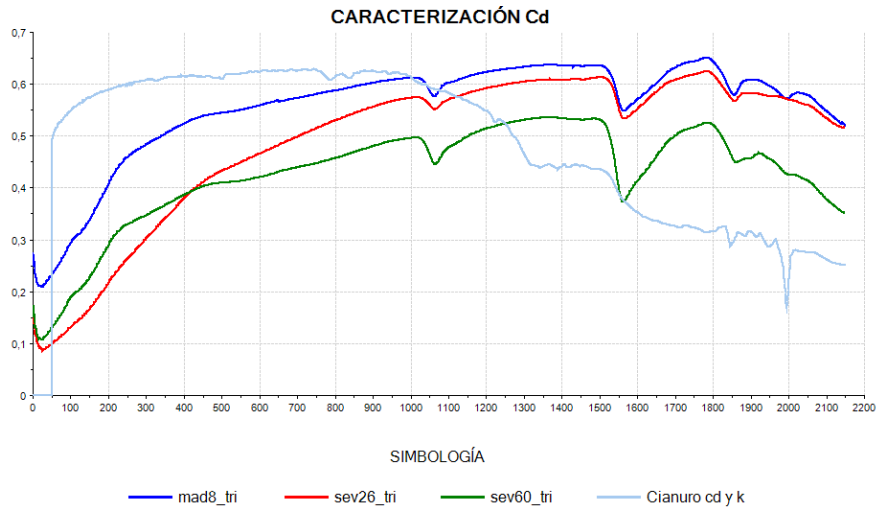


Figura 4.53: Firmas espectrales de suelo con diferente contenido de Cd.

Al igual que lo realizado en la caracterización espectral del As, se procedió con la selección de bandas espectrales absortivas-reflectivas en función de la comparación de las firmas base (suelo y vegetación) versus el compuesto de Cianuro (Tabla 4.16), y posteriormente se realizó la selección respectiva sobre las firmas transformadas y sobre las correlaciones efectuadas, obteniendo como resultado la Tabla 4.17 y Tabla 4.18, respectivamente.

Tabla 4.16: Caracterización de Cd a partir de las firmas espectrales base.

Firma espectral	Tipo	λ (nm) central	Ancho (nm)	Profundidad (Δ Reflectividad)	Simetría
SEV-S-060 _ tri (SUELO)	Reflectivo	2136**	2095-2158	ρ_1 = 0,52542 ρ_2 = 0,51574 ρ_1-ρ_2 = 0,00968	Simétrica
	Absortivo	2212*	2202-2235	ρ_1 = 0,45559 ρ_2 = 0,44900 ρ_1-ρ_2 = 0,00659	Asimetría +
	Reflectivo	2272**	2248-2297	ρ_1 = 0,46641 ρ_2 = 0,45663 ρ_1-ρ_2 = 0,00978	Simétrica
TEPRO-C-004 (VEGETACIÓN)	Reflectivo	1111*	986-1168	ρ_1 = 0,87688 ρ_2 = 0,82931 ρ_1-ρ_2 = 0,04757	Asimetría -
	Absortivo	1201*	1158-1260	ρ_1 = 0, 84148 ρ_2 = 0, 80413 ρ_1-ρ_2 = 0,03735	Simétrica
	Absortivo	1726*	1683-1848	ρ_1 = 0,60179 ρ_2 = 0,55800 ρ_1-ρ_2 = 0,04379	Asimetría +
	Reflectivo	2219**	2167-2242	ρ_1 = 0,42074 ρ_2 = 0,40212 ρ_1-ρ_2 = 0,01862	Simétrica

Firma espectral	Tipo	λ (nm) central	Ancho (nm)	Profundidad (Δ Reflectividad)	Simetría
	Absortivo	2308**	2294-2325	ρ_1 = 0,33481 ρ_2 = 0,32883 ρ_1-ρ_2 = 0,00598	Asimetría +

*Banda con alto contraste espectral y desplazamiento menor a 20 nm referente al espectro puro;
**Bandas con alto contraste espectral y desplazamiento entre 20 a 50 nm referente al espectro puro

Tabla 4.17: Selección de bandas espectrales sensibles al contenido de Cd a partir de las transformaciones de las firmas espectrales.

Tipo	Suelo (SEV-S-060 _ tri)		Vegetación (TEPRO-C-004)	
	λ (nm) - Pico	λ (nm) - Valle	λ (nm) - Pico	λ (nm) - Valle
Detrend	1840*	1912**	---	673*
	2139**	2210*	---	1206*
	2278**	2345*	1297*	1721**
	---	---	1866*	1929**
	---	---	2231**	2275**
1ª derivada	439*	1894*	---	660*
	---	2195*	698*	1160*
	2219*	2238**	1223**	1565*
	2260**	2329*	1603**	1691**
	2357*	---	1770*	1900*
	---	---	2196*	2252**
	---	---	2316*	2339*
	---	---	2369*	---
2ª derivada	---	1884*	687*	707*
	1905*	---	---	1885*
	2208*	2375*	1913*	2230*
	---	---	2309*	---

*Banda con alto contraste espectral y desplazamiento menor a 20 nm referente a las transformadas;
**Bandas con alto contraste espectral y desplazamiento entre 20 a 50 nm referente a las transformadas

Tabla 4.18: Selección de longitudes de onda sensibles al contenido de Cd empleando la correlación entre firmas espectrales y analíticas.

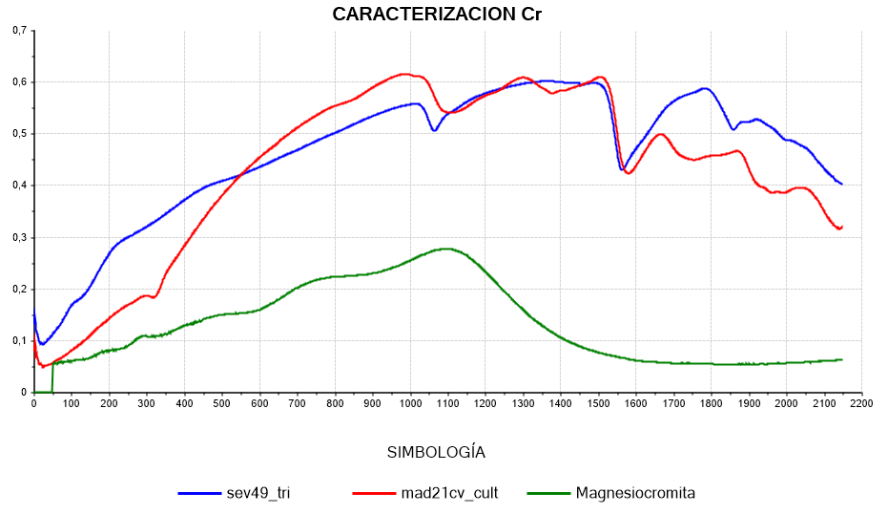
Tipo	Suelo (triturado)		Vegetación	
	λ (nm)	%	λ (nm)	%
Base	1414	-45,4	2017	-41,8
	2343	-46,7	2178	-38,3
1ª derivada	550	-37,8	522	67,7
	1911	34,9	609	-60,7
	2229	-49,5	706	62,6
	2393	35,4	1153	-52,6
2ª derivada	730	58,0	513	83,4

Tipo	Suelo (triturado)		Vegetación	
	λ (nm)	%	λ (nm)	%
	820	-54,6	533	-79,3
	1046	-53,4	766	80,7
	1237	-45,1	872	-74,5
	1794	54,4	1170	85,2
	2233	56,6	2432	-81,2

c. Cr

El estudio de espectrometría realizado por Song et al. (2015) mencionan que, las bandas espectrales óptimas para la construcción de modelos de Cr son: 480, 500, 610, 715, 750, 860, 1.300, 1.430, 1.755, 1.920 y 1.950 nm, dichas bandas fueron seleccionadas a partir de las mejores correlaciones de Pearson entre las firmas espectrales de suelo y los análisis químicos.

El proceso de caracterización fue realizado en función de la estación muestral SEV-S-049 (firma de color azul) para el caso de suelo y de la MAD-S-021cv (firma de color rojo) para el caso de la vegetación (cereal), las cuales fueron confrontadas con el mineral Magnesiocromita (firma de color verde) (Figura 4.54).



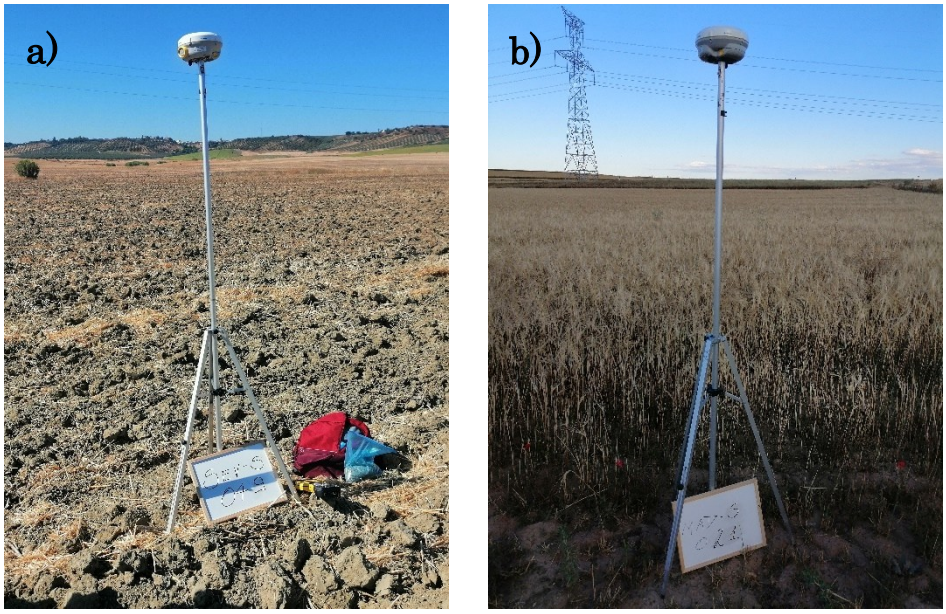


Figura 4.54: Firmas espectrales de suelo y vegetación para caracterización de Cr y sus correspondientes fotografías en campo: a) suelo; b) vegetación (cereal).

Con la finalidad de realizar una comparativa de diferentes concentraciones de Cr en suelo, se tomaron las estaciones muestrales con mayor concentración de este metal (SEV-S-065, suelo arcilloso), menor concentración (MAD-S-018, suelo areno francoso) y aquella estación seleccionada para la caracterización (SEV-S-049, suelo franco arcilloso). Se puede evidenciar en la Figura 4.55 que mientras incrementa la concentración de Cr reduce la reflectividad, sucediendo lo contrario en el rango espectral de 1.900 a 2.000 nm, sin embargo, es importante recalcar la diferencia en los tipos de suelo. En la porción del visible, aquellas estaciones que sobrepasan el límite permisible de concentración de Cr, presentan un comportamiento homogéneo.

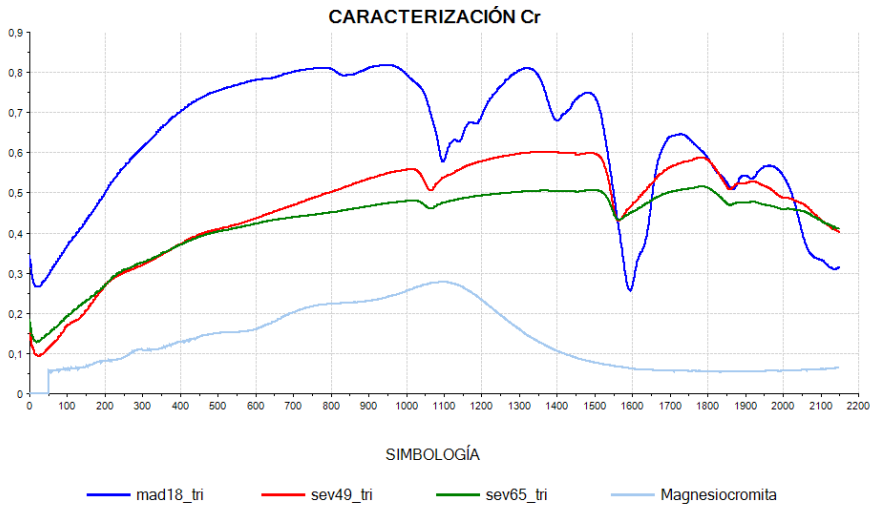
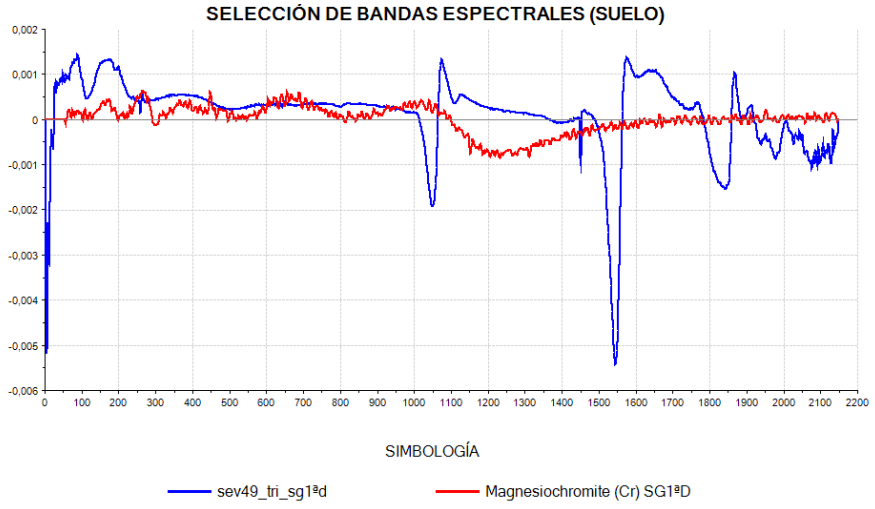


Figura 4.55: Firmas espectrales de suelo con diferente contenido de Cr.

Al realizar las transformaciones de las firmas espectrales y compararlas con las respectivas transformaciones de los elementos puros se evidencia una elevada complejidad para seleccionar los picos y valles concordantes, como se puede evidenciar en la Figura 4.56. Las firmas de color azul corresponden a la 1ª derivada de las estaciones muestrales empleadas y la firma de color rojo es correspondiente a la 1ª derivada del mineral Magnesiocromita.



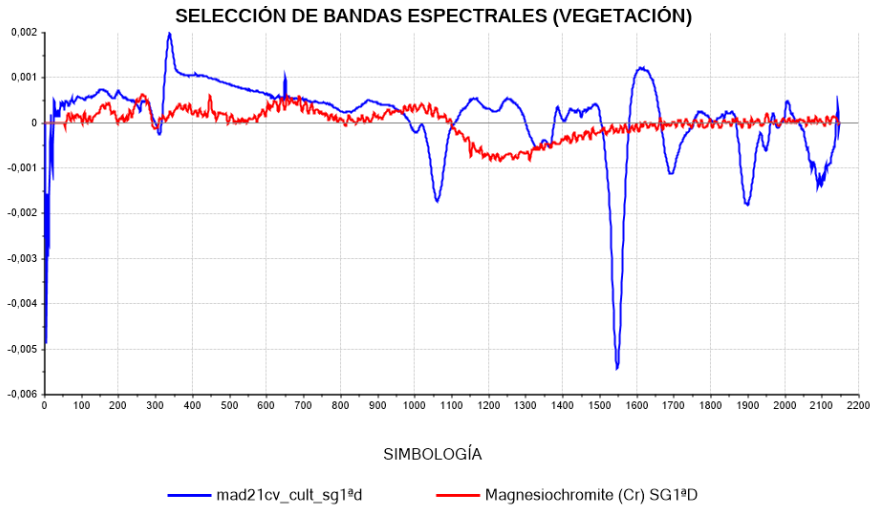


Figura 4.56: Contraste de la 1ª derivada de las firmas espectrales de suelo (superior) y vegetación (inferior) versus la respectiva transformada del elemento Magnesiocromita.

En función de esto, se expone a continuación la selección de bandas espectrales a partir de las firmas base, de los datos transformados y de las correlaciones realizadas, en la Tabla 4.19, Tabla 4.20 y Tabla 4.21, respectivamente.

Tabla 4.19: Caracterización de Cr a partir de las firmas espectrales base.

Firma espectral	Tipo	λ (nm) central	Ancho (nm)	Profundidad (Δ Reflectividad)	Simetría
SEV-S-049 _ tri (SUELO)	Absortivo	1414**	1394-1444	ρ_1 = 0,53480 ρ_2 = 0,50546 ρ_1-ρ_2 = 0,02934	Simétrica
MAD-S-021 (VEGETACIÓN)	Reflectivo	650*	634-665	ρ_1 = 0,18617 ρ_2 = 0,18345 ρ_1-ρ_2 = 0,00272	Simétrica
	Absortivo	667*	656-674	ρ_1 = 0,18609 ρ_2 = 0,18358 ρ_1-ρ_2 = 0,00251	Asimetría -
	Absortivo	1460*	1379-1640	ρ_1 = 0,61014 ρ_2 = 0,54108 ρ_1-ρ_2 = 0,06906	Asimetría +

*Banda con alto contraste espectral y desplazamiento menor a 20 nm referente al espectro puro;
**Bandas con alto contraste espectral y desplazamiento entre 20 a 50 nm referente al espectro puro

Tabla 4.20: Selección de bandas espectrales sensibles al contenido de Cr a partir de las transformaciones de las firmas espectrales.

Tipo	Suelo (SEV-S-049 _ tri)		Vegetación (MAD-S-021)	
	λ (nm) - Pico	λ (nm) - Valle	λ (nm) - Pico	λ (nm) - Valle
Detrend	---	1415**	---	673**
	---	1913**	---	1467**

Tipo	Suelo (SEV-S-049 _ tri)		Vegetación (MAD-S-021)	
	λ (nm) - Pico	λ (nm) - Valle	λ (nm) - Pico	λ (nm) - Valle
	---	---	---	1928**
1ª derivada	525*	540*	504*	---
	549*	---	615*	661*
	614*	---	---	1162*
	---	---	2319*	---
2ª derivada	---	---	---	---

*Banda con alto contraste espectral y desplazamiento menor a 20 nm referente a las transformadas; **Bandas con alto contraste espectral y desplazamiento entre 20 a 50 nm referente a las transformadas

Tabla 4.21: Selección de longitudes de onda sensibles al contenido de Cr empleando la correlación entre firmas espectrales y analíticas.

Tipo	Suelo (triturado)		Vegetación	
	λ (nm)	%	λ (nm)	%
Base	1044	-50,0	1340	-55,1
	1673	-45,4	1628	-47,0
1ª derivada	615	-44,7	1435	56,8
	1354	46,0	1679	75,3
	1658	-45,0	2201	-60,2
	2378	44,5	2376	-65,5
2ª derivada	674	58,5	957	81,4
	696	-50,9	1254	79,8
	761	60,3	1821	-72,6
	922	-49,6	2099	-79,7
	1142	61,5	2185	-81,0
	2215	-51,0	2264	88,9

d. Cu

Al igual que el As, las mejores longitudes de onda en estudios de minería se concentran alrededor de: 460, 1.400, 1.900 y 2.200 nm (Ren et al., 2009), sin embargo, Zhang et al. (2010) después de realizar medidas espectrales en laboratorio de suelo y su contenido de Cu, determinaron que, las longitudes de onda características para la generación de un modelo son: 1.836, 1.886, 2.284, 536, 1.764, 1.648, 1.434, 1.512, 2.094 y 530 nm. Por otro lado, para el caso de la vegetación, Ren et al. (2010) mencionan que, las longitudes de onda óptimas para la detección de Cu en hojas de arroz son: 460, 560, 660 y 1.100 nm.

Dentro del proceso de caracterización y selección de longitudes de onda características, se emplearon las estaciones muestrales SEV-S-054 (firma de color

azul) para el caso del suelo y SEV-C-048 (firma de color rojo) para la vegetación (olivar), las cuales fueron confrontadas con la firma espectral correspondiente al mineral Azurita (firma de color verde) (Figura 4.57).

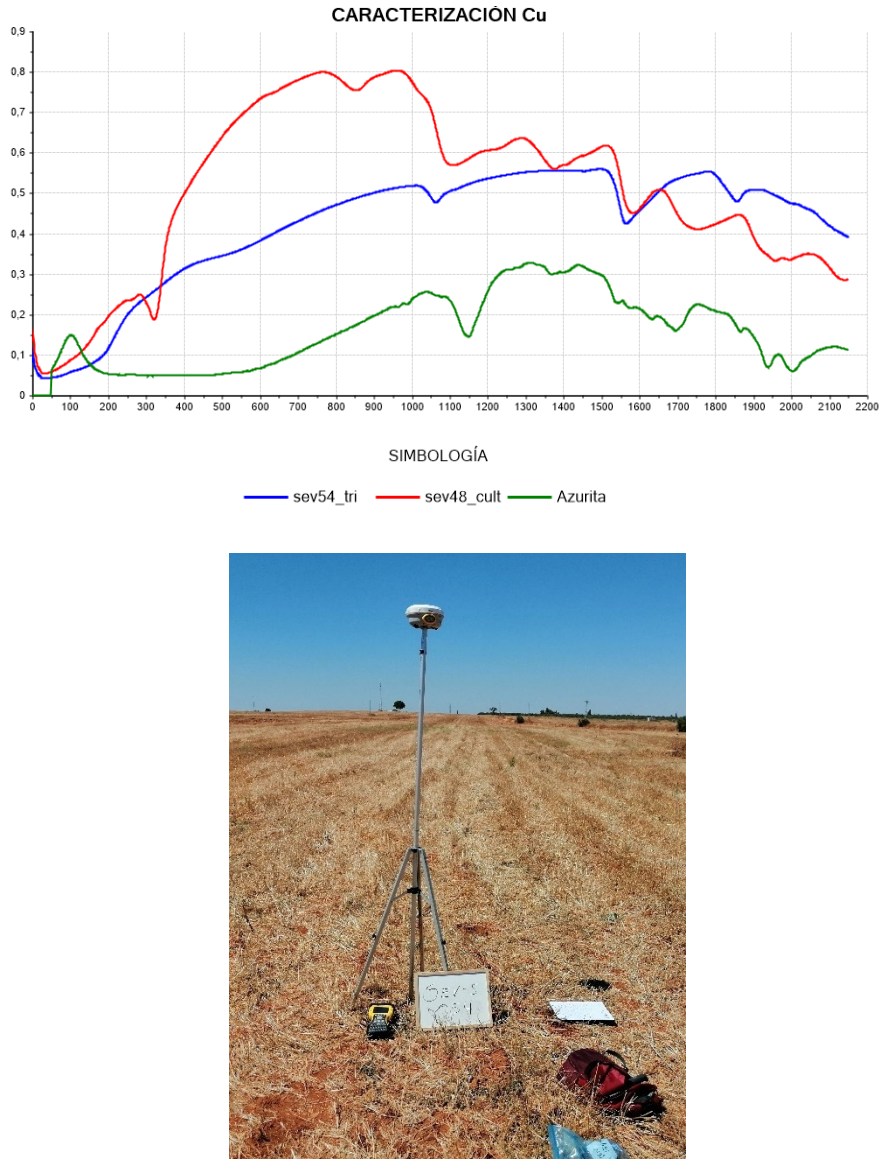


Figura 4.57: Firmas espectrales de suelo y vegetación para caracterización de Cu (superior) y su correspondiente fotografía en campo (inferior).

El análisis de la variación de Cu en suelo se lo realizó a partir de las estaciones MAD-S-021 (baja concentración de Cu -> firma de color azul) y SEV-S-054 (alta concentración de Cu y estación muestral tipo -> firma de color rojo), de textura franco arcilloso y franco arenoso respectivamente, en donde se puede verificar que, a mayor contenido de Cu, menor es la reflectividad, aproximadamente en 0,05 puntos a lo largo de todo el rango espectral estudiado (Figura 4.58).

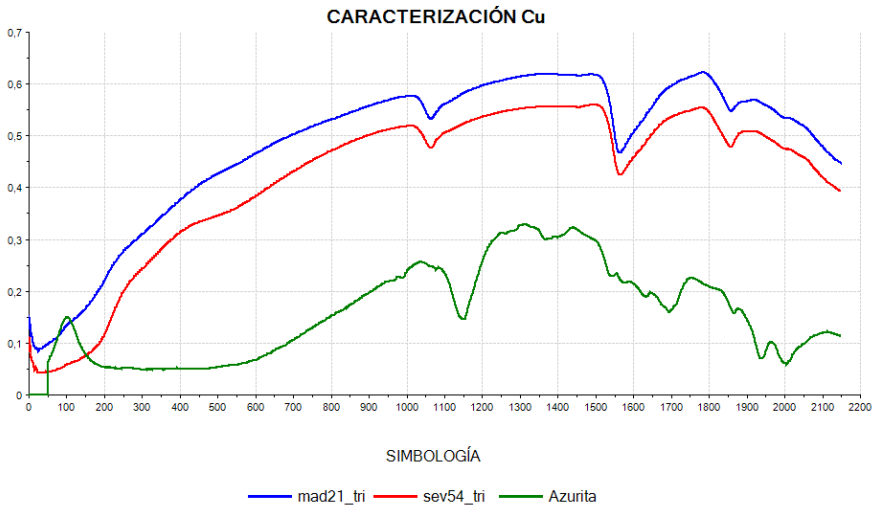


Figura 4.58: Firmas espectrales de suelo con diferente contenido de Cu.

En la Figura 4.59 se puede evidenciar la comparación entre la 1ª derivada de la muestra SEV-S-054 (suelo), firma de color azul, y la firma análoga del mineral Azurita de color rojo, presentando altas coincidencias sobre todo en el infrarrojo medio.

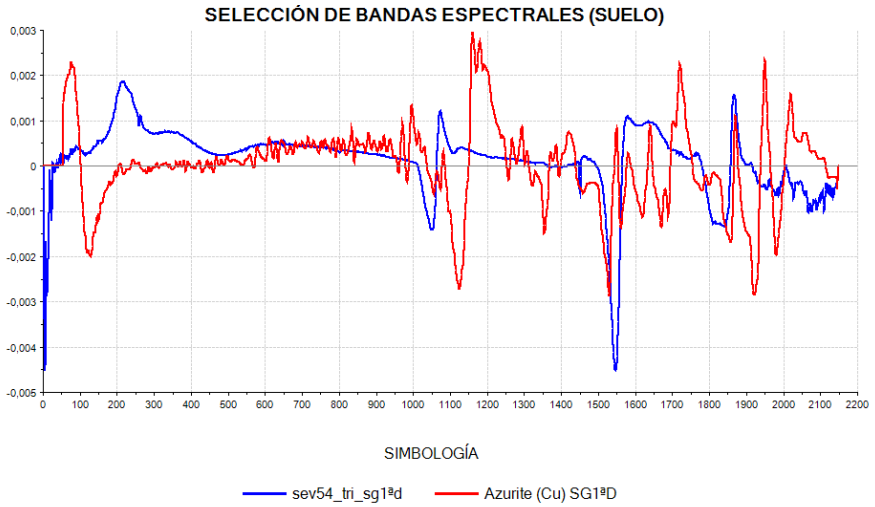


Figura 4.59: Contraste de la 1ª derivada de la firma espectral de suelo triturado (SEV-S-054) con la 1ª derivada de la Azurita.

Posteriormente, se seleccionaron las bandas espectrales de las firmas base a partir de la comparación con la firma del mineral Azurita (Tabla 4.22), de manera similar se realizó con las transformaciones de las firmas (Tabla 4.23), y con las

correlaciones entre las firmas espectrales y las analíticas de cada una de las estaciones muestrales (Tabla 4.24).

Tabla 4.22: Caracterización de Cu a partir de las firmas espectrales base.

Firma espectral	Tipo	λ (nm) central	Ancho (nm)	Profundidad (Δ Reflectividad)	Simetría
SEV-S-054 _ tri (SUELO)	Reflectivo	1363**	873-1411	$\rho_1 = 0,51900$ $\rho_2 = 0,47734$ $\rho_1-\rho_2 = 0,04166$	Asimetría -
	Reflectivo	2130**	1980-2202	$\rho_1 = 0,55447$ $\rho_2 = 0,48151$ $\rho_1-\rho_2 = 0,07296$	Asimetría -
	Absortivo	2207*	2182-2230	$\rho_1 = 0,50471$ $\rho_2 = 0,47871$ $\rho_1-\rho_2 = 0,0360$	Simétrico
	Reflectivo	2267**	2211-2332	$\rho_1 = 0,50872$ $\rho_2 = 0,47992$ $\rho_1-\rho_2 = 0,0288$	Asimetría +
SEV-C-048 (VEGETACIÓN)	Absortivo	1458**	1428-1532	$\rho_1 = 0,60379$ $\rho_2 = 0,56916$ $\rho_1-\rho_2 = 0,03463$	Asimetría -
	Reflectivo	1640*	1574-1677	$\rho_1 = 0,63631$ $\rho_2 = 0,60913$ $\rho_1-\rho_2 = 0,02718$	Simétrico
	Absortivo	1726*	1713-1740	$\rho_1 = 0,56686$ $\rho_2 = 0,55934$ $\rho_1-\rho_2 = 0,00752$	Simétrico
	Absortivo	2308**	2297-2321	$\rho_1 = 0,33878$ $\rho_2 = 0,33299$ $\rho_1-\rho_2 = 0,00579$	Asimetría +

*Banda con alto contraste espectral y desplazamiento menor a 20 nm referente al espectro puro;
**Bandas con alto contraste espectral y desplazamiento entre 20 a 50 nm referente al espectro puro

Tabla 4.23: Selección de bandas espectrales sensibles al contenido de Cu a partir de las transformaciones de las firmas espectrales.

Tipo	Suelo (SEV-S-054 _ tri)		Vegetación (SEV-C-048)	
	λ (nm) - Pico	λ (nm) - Valle	λ (nm) - Pico	λ (nm) - Valle
Detrend	2135**	2206*	---	1458**
	2279**	---	1646*	1724*
	---	---	2012**	2075**
1ª derivada	---	469*	---	1693*
	1809**	1897*	1735*	1750*
	1928**	2192*	1772*	1900*
	2217*	---	1966**	2038*
	2357**	---	---	2242**
	---	---	2317*	2339*
	---	---	2355*	---
2ª derivada	1413*	1887*	1430*	---

Tipo	Suelo (SEV-S-054 _ tri)		Vegetación (SEV-C-048)	
	λ (nm) - Pico	λ (nm) - Valle	λ (nm) - Pico	λ (nm) - Valle
	1908**	---	1727*	1740*
	2208*	2223*	---	1885**
	---	---	1909**	---
	---	---	2304*	2322*

*Banda con alto contraste espectral y desplazamiento menor a 20 nm referente a las transformadas; **Bandas con alto contraste espectral y desplazamiento entre 20 a 50 nm referente a las transformadas

Tabla 4.24: Selección de longitudes de onda sensibles al contenido de Cu empleando la correlación entre firmas espectrales y analíticas.

Tipo	Suelo (triturado)		Vegetación	
	λ (nm)	%	λ (nm)	%
Base	551	-34,8	1724	-45,0
	---	---	1979	44,3
1ª derivada	447	-40,9	1225	79,6
	487	-44,3	1706	-79,4
	970	35,3	1780	90,0
	1117	31,5	2295	-83.9
2ª derivada	559	60,6	1740	-81,2
	625	-46,8	1757	84,7
	755	-50,2	1806	84,3
	862	48,9	2204	-81,0
	2414	-43,9	2304	90,9
	2429	56,8	2321	-85,8

e. Hg

Wang et al. (2018) mencionan que, el mejor rango espectral para estudiar Hg en suelo va de los 1.140 a los 1.200 nm, y la mejor banda de detección del presente elemento traza se centra en los 1.186 nm. En cuanto a la vegetación, un estudio realizado por Dunagan et al. (2007) sobre cultivo de nabo, mencionan que las bandas espectrales con mayor correlación respecto a la concentración de Hg, son: 430, 448, 471 y 550 nm.

Las estaciones muestrales seleccionadas para realizar la caracterización fueron: MAD-S-006 (suelo -> firma de color azul) y SEV-C-030 (vegetación – olivar -> firma de color rojo), las cuales se diferencian por su alta concentración en Hg y baja cantidad en el resto de elementos traza analizados en el presente estudio (Figura 4.60).

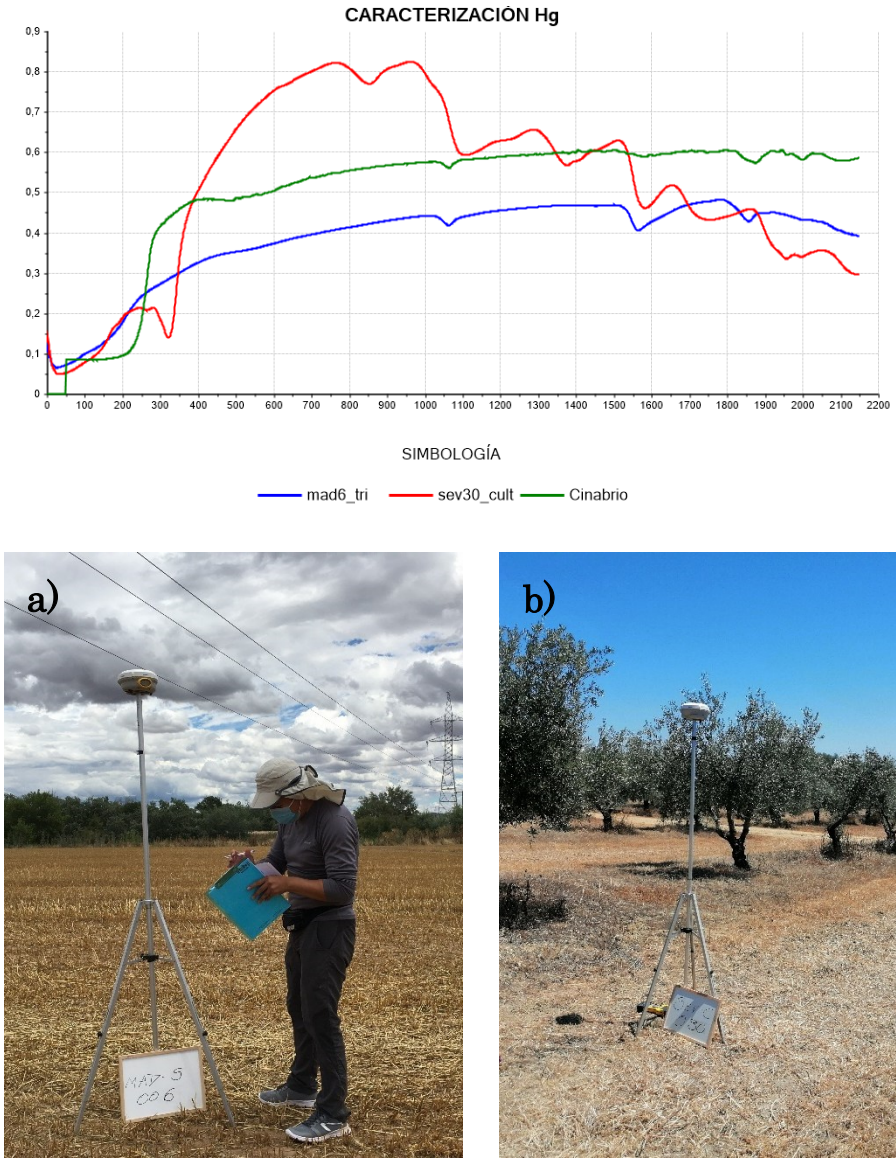


Figura 4.60: Firmas espectrales de suelo y vegetación para caracterización de Hg y sus correspondientes fotografías en campo: a) suelo; b) vegetación (olivar).

En la Figura 4.61 se puede evidenciar diferentes firmas espectrales con distintas concentraciones de Hg en suelo, y su respectivo espectro puro. La estación muestral SEV-S-059 (firma de color verde) tiene la mayor concentración de Hg (0,25 ppm), la estación MAD-S-006 (firma de color azul) fue seleccionada para el proceso de caracterización, misma que se encuentra por encima de los límites permisibles (0,19 ppm), y la estación SEV-S-051 (firma de color rojo) con la menor cantidad de Hg (0,01 ppm), siendo de texturas franco arenoso a areno francoso. En el campo del visible presentan altas similitudes las firmas espectrales, sin embargo, a partir de los 700 nm, las estaciones muestrales que contienen concentraciones de Hg por

encima del límite permisible, presentan una disminución en la reflectividad, de aproximadamente 0,13 puntos.

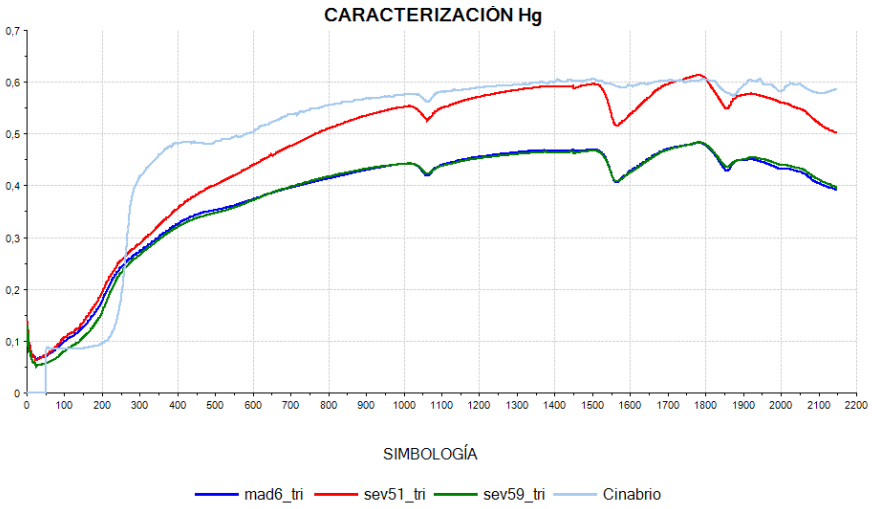


Figura 4.61: Firmas espectrales de suelo con diferente contenido de Hg.

Para el caso de la transformación denominada eliminación de tendencias (Figura 4.62), a partir de la firma espectral del suelo, se puede evidenciar altas similitudes en las longitudes de onda próximas a 1.410 y 2.210 nm. La firma de color azul corresponde a la transformación de eliminación de tendencia de la estación muestral y la firma de color rojo al proceso símil aplicado en el mineral Cinabrio.

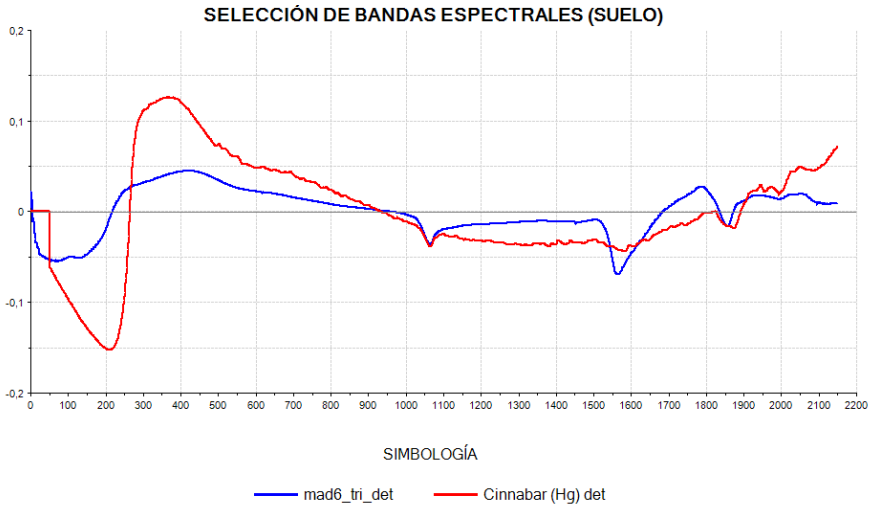


Figura 4.62: Contraste de la transformación *detrend* de la firma espectral de suelo triturado (SEV-S-032) con su similar del Cinabrio.

La selección de bandas espectrales fue el siguiente paso, en donde se utilizaron las firmas espectrales base (Tabla 4.25), diferentes transformaciones de las firmas de suelo y vegetación (Tabla 4.26), las cuales fueron comparadas con sus similares provenientes del mineral Cinabrio, y, por último, se presentan la selección de bandas a partir de las correlaciones (Tabla 4.27)

Tabla 4.25: Caracterización de Hg a partir de las firmas espectrales base.

Firma espectral	Tipo	λ (nm) central	Ancho (nm)	Profundidad (Δ Reflectividad)	Simetría
MAD-S-006 _ tri (SUELO)	Absortivo	1413*	1385-1445	ρ_1 = 0,43833 ρ_2 = 0,41835 ρ_1-ρ_2 = 0,01998	Simétrico
	Absortivo	1914*	1867-2030	ρ_1 = 0,46694 ρ_2 = 0,40623 ρ_1-ρ_2 = 0,06071	Asimetría +
	Reflectivo	2133*	1957-2203	ρ_1 = 0,48272 ρ_2 = 0,42984 ρ_1-ρ_2 = 0,05288	Asimetría -
	Absortivo	2207*	2186-2230	ρ_1 = 0,44749 ρ_2 = 0,42846 ρ_1-ρ_2 = 0,01903	Simétrico
SEV-C-030 (VEGETACIÓN)	Absortivo	1457**	1429-1528	ρ_1 = 0,62184 ρ_2 = 0,59297 ρ_1-ρ_2 = 0,02887	Asimetría +
	Reflectivo	1861*	1757-1892	ρ_1 = 0,62922 ρ_2 = 0,57948 ρ_1-ρ_2 = 0,04974	Asimetría -
	Absortivo	1933*	1905-1991	ρ_1 = 0,51619 ρ_2 = 0,46146 ρ_1-ρ_2 = 0,05473	Simétrico
	Absortivo	2307**	2295-2320	ρ_1 = 0,34387 ρ_2 = 0,33546 ρ_1-ρ_2 = 0,00841	Simétrico
	Reflectivo	2398**	2353-2435	ρ_1 = 0,35680 ρ_2 = 0,34218 ρ_1-ρ_2 = 0,01462	Simétrico

*Banda con alto contraste espectral y desplazamiento menor a 20 nm referente al espectro puro;
**Bandas con alto contraste espectral y desplazamiento entre 20 a 50 nm referente al espectro puro

Tabla 4.26: Selección de bandas espectrales sensibles al contenido de Hg a partir de las transformaciones de las firmas espectrales.

Tipo	Suelo (MAD-S-006 _ tri)		Vegetación (SEV-C-030)	
	λ (nm) - Pico	λ (nm) - Valle	λ (nm) - Pico	λ (nm) - Valle
Detrend	768**	1413*	---	1457**
	---	1914*	1867*	1928*
	2137**	2206*	2223**	---
	---	2345*	---	---
	2402*	---	---	---

Tipo	Suelo (MAD-S-006 _ tri)		Vegetación (SEV-C-030)	
	λ (nm) - Pico	λ (nm) - Valle	λ (nm) - Pico	λ (nm) - Valle
1ª derivada	---	1400*	---	1414*
	1422*	---	1967**	---
	1931*	2187*	2317*	2337*
	2217**	---	2355*	---
2ª derivada	612*	615*	---	1403*
	1413*	1427*	1429*	---
	2208*	2222**	2306*	2320*

*Banda con alto contraste espectral y desplazamiento menor a 20 nm referente a las transformadas; **Bandas con alto contraste espectral y desplazamiento entre 20 a 50 nm referente a las transformadas

Tabla 4.27: Selección de longitudes de onda sensibles al contenido de Hg empleando la correlación entre firmas espectrales y analíticas.

Tipo	*Suelo (triturado)*		*Vegetación*	
	λ (nm)	%	λ (nm)	%
Base	1549	-46,0	533	-52,7
	1732	-46,0	1723	-46,4
1ª derivada	484	-39,8	1710	-69,8
	1400	42,2	1774	80,3
	2050	-42,6	2292	-83,2
	2171	41,1	2315	81,7
2ª derivada	420	-52,1	1387	86,8
	922	-51,1	1696	-72,6
	975	55,7	1807	81,3
	1834	52,7	1918	-75,3
	1972	-55,2	2305	85,5
	2060	60,0	2321	-85,9

f. Ni

En el estudio realizado por Lu et al. (2020), emplearon el método de extracción *three-step* para la determinación de Ni en suelo, en donde seleccionaron bandas características a partir de diferentes transformaciones de las firmas espectrales de las muestras de suelo, obteniendo como resultado: 640, 750, 850, 870, 1.020, 1.040, 1.180, 1.190, 1.380, 1.520, 1.550, 1.840, 1.940, 2.140, 2.150, 2.160, 2.170, 2.250, 2.260, 2.300, 2.320, y 2.400 nm.

Dentro de la presente investigación, el proceso de caracterización se realizó a partir de las firmas espectrales de las estaciones SEV-S-041 (firma de color azul) para el caso del suelo, y MAD-C-016 (firma de color rojo) para la vegetación (herbácea nativa), las cuales fueron confrontadas con el compuesto de Cianuro de níquel y

potasio (firma de color verde) proveniente de la USGS, extrayendo bandas absortivas y reflectivas en común (Figura 4.63).

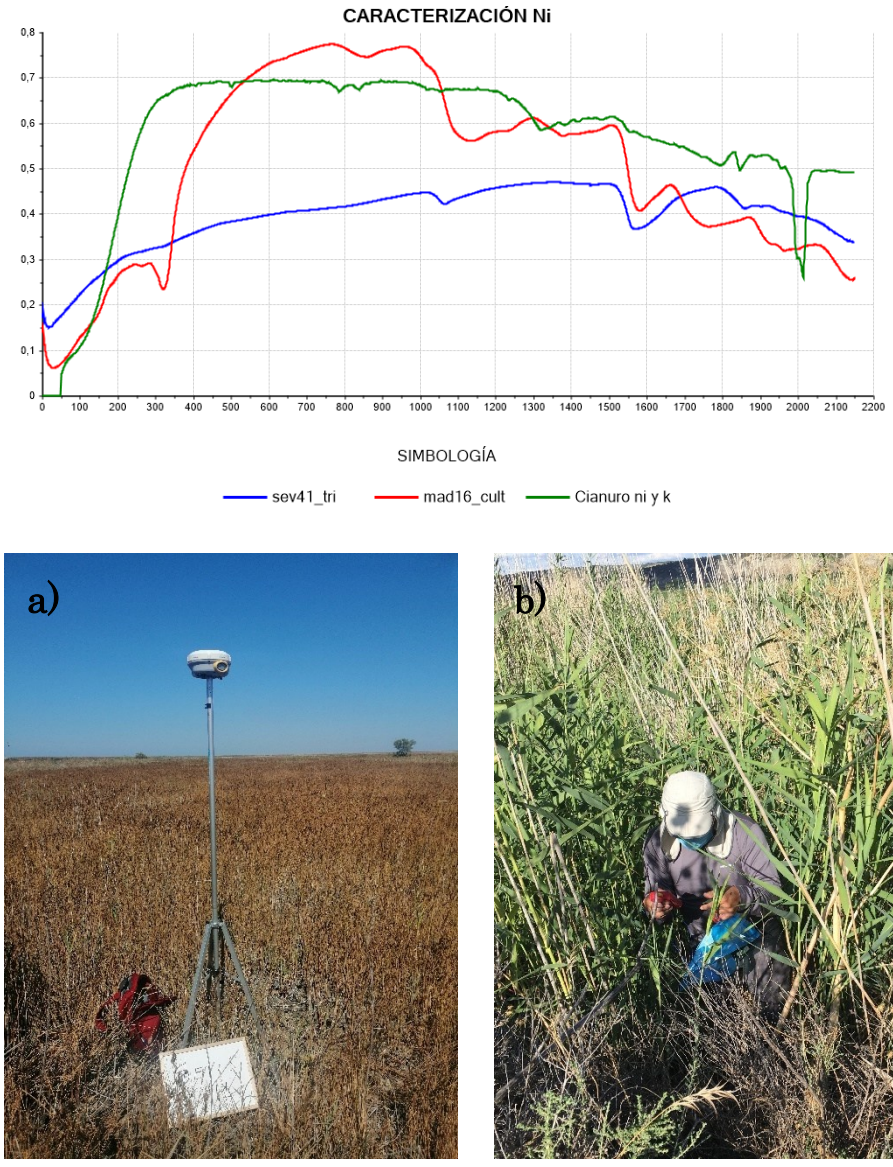


Figura 4.63: Firmas espectrales de suelo y vegetación para caracterización de Ni y sus correspondientes fotografías en campo: a) suelo; b) vegetación (herbácea nativa).

Se realizó una comparativa entre las firmas espectrales de suelo de las estaciones muestrales con mayor concentración de Ni (SEV-S-029 -> firma de color rojo), menor concentración de Ni (MAD-S-014 -> firma de color azul), y la estación seleccionada con contenido de Ni por encima del límite permisible (SEV-S-041 -> firma de color verde), de textura variable de franco a arcillo limoso. Las 2 primeras presentan altas similitudes del 900 al 1.900 nm, caso contrario sucede con la firma de la estación SEV-S-041, presentando una menor reflectividad, pudiendo deberse

esto al contenido de materia orgánica, siendo entre 3 a 5 veces mayor esta última (Figura 4.64).

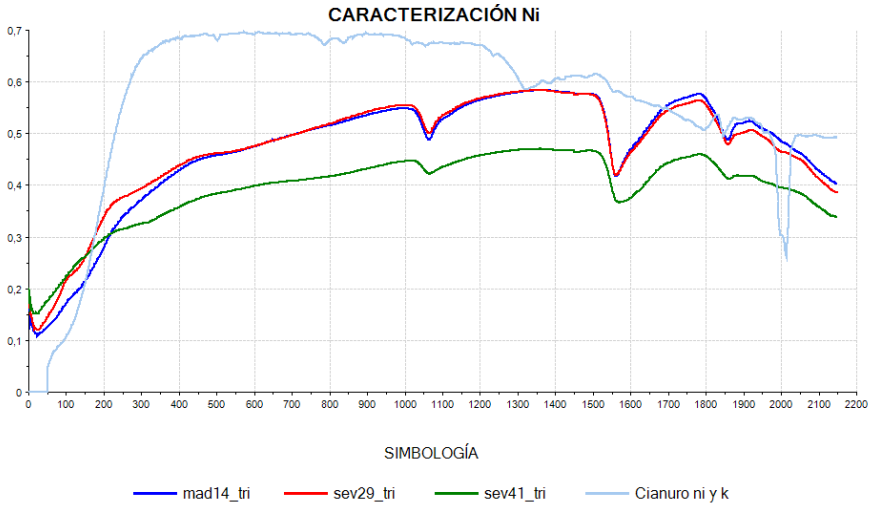


Figura 4.64: Firmas espectrales de suelo con diferente contenido de Ni.

En la Figura 4.65, se presenta la 1ª derivada de suelo triturado (firma de color azul) versus la 1ª derivada del compuesto de Cianuro (firma de color rojo), evidenciando una elevada complejidad a la hora de extraer las firmas espectrales características.

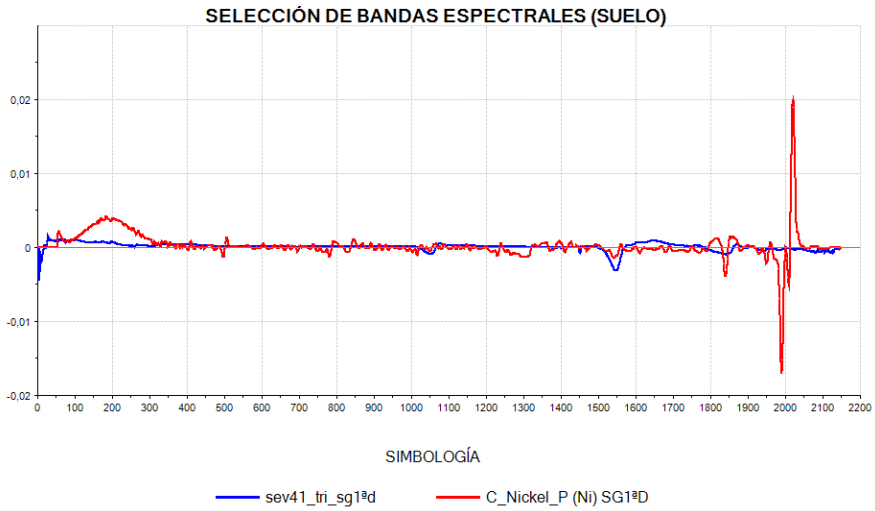


Figura 4.65: Contraste de la 1ª derivada de la firma espectral de suelo triturado (SEV-S-032) con la 1ª derivada de la Escorodita.

A continuación, se efectuó la selección de bandas a partir de las firmas base (Tabla 4.28), y de las transformaciones de las firmas de suelo triturado y vegetación (Tabla 4.29), en comparación con las respectivas firmas del compuesto de Cianuro de

Níquel y Potasio. Además, se seleccionaron aquellas longitudes de onda con alta correlación entre las firmas espectrales y las analíticas (Tabla 4.30).

Tabla 4.28: Caracterización de Ni a partir de las firmas espectrales base.

Firma espectral	Tipo	λ (nm) central	Ancho (nm)	Profundidad (Δ Reflectividad)	Simetría
SEV-S-041 _ tri (SUELO)	Absortivo	1415*	1378-1491	ρ_1 = 0,44605 ρ_2 = 0,42177 ρ_1-ρ_2 = 0,02428	Asimetría +
	Reflectivo	2133**	2004-2206	ρ_1 = 0,45937 ρ_2 = 0,41348 ρ_1-ρ_2 = 0,04589	Asimetría -
	Absortivo	2211*	2200-2226	ρ_1 = 0,41782 ρ_2 = 0,41232 ρ_1-ρ_2 = 0,0055	Simétrico
	Reflectivo	2235**	2225-2253	ρ_1 = 0,41836 ρ_2 = 0,41697 ρ_1-ρ_2 = 0,00139	Asimetría +
MAD-C-016 (VEGETACIÓN)	Absortivo	1209**	1163-1250	ρ_1 = 0,75907 ρ_2 = 0,74581 ρ_1-ρ_2 = 0,01326	Asimetría -
	Reflectivo	1857*	1768-1880	ρ_1 = 0,59560 ρ_2 = 0,57612 ρ_1-ρ_2 = 0,01948	Asimetría -
	Absortivo	2115**	2070-2212	ρ_1 = 0,39169 ρ_2 = 0,37235 ρ_1-ρ_2 = 0,01934	Asimetría +
	Reflectivo	2219**	2119-2244	ρ_1 = 0,39286 ρ_2 = 0,37258 ρ_1-ρ_2 = 0,02028	Asimetría -
	Absortivo	2315**	2308-2326	ρ_1 = 0,32191 ρ_2 = 0,31927 ρ_1-ρ_2 = 0,00264	Simétrico

*Banda con alto contraste espectral y desplazamiento menor a 20 nm referente al espectro puro;
**Bandas con alto contraste espectral y desplazamiento entre 20 a 50 nm referente al espectro puro

Tabla 4.29: Selección de bandas espectrales sensibles al contenido de Ni a partir de las transformaciones de las firmas espectrales.

Tipo	Suelo (SEV-S-041 _ tri)		Vegetación (MAD-C-016)	
	λ (nm) - Pico	λ (nm) - Valle	λ (nm) - Pico	λ (nm) - Valle
Detrend	---	671*	---	673*
	---	1416*	---	1216**
	1844**	---	---	1725*
	2140**	2209*	1865*	---
	2277*	---	2232**	---
1ª derivada	---	1402**	513**	1416**
	1424*	1897*	1605*	1900*
	---	2193*	1952**	2250**
	2219*	2291*	---	---

Tipo	Suelo (SEV-S-041 _ tri)		Vegetación (MAD-C-016)	
	λ (nm) - Pico	λ (nm) - Valle	λ (nm) - Pico	λ (nm) - Valle
2ª derivada	---	425*	---	636*
	612*	---	683*	700*
	1413**	1890*	1368*	1888*
	1908*	---	1912*	---
	2207*	---	---	---

*Banda con alto contraste espectral y desplazamiento menor a 20 nm referente a las transformadas; **Bandas con alto contraste espectral y desplazamiento entre 20 a 50 nm referente a las transformadas

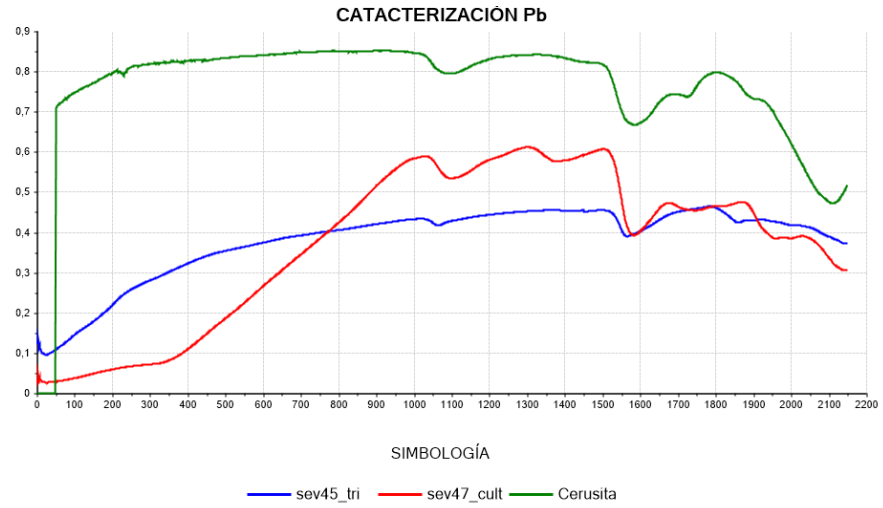
Tabla 4.30: Selección de longitudes de onda sensibles al contenido de Ni empleando la correlación entre firmas espectrales y analíticas.

Tipo	Suelo (triturado)		Vegetación	
	λ (nm)	%	λ (nm)	%
Base	1073	-62,3	1640	-60,0
	2245	-63,3	2004	-56,7
1ª derivada	615	-48,7	1680	51,2
	1354	46,1	2214	38,6
	1658	-50,1	2350	-50,6
	2378	47,3	2440	-47,0
2ª derivada	488	-51,4	1068	-65,4
	757	-50,5	1658	64.5
	762	66,8	2168	-66,1
	902	56,4	2190	71,5
	1780	-50,6	2438	-66,9
	2256	58,8	2442	82,8

g. Pb

El estudio realizado por Zhang et al. (2010) concluyen que, las bandas centradas alrededor de los 838, 1,930 y 2,148 nm son sensibles al contenido de Pb en suelo, por otro lado, como se mencionó anteriormente, Ren et al. (2010) mencionan que, las longitudes de onda de los 460, 560, 660 y 1,100 nm son óptimas para detectar As, Pb, Zn y Cu en hojas de arroz.

Para realizar la caracterización se compararon las estaciones muestrales SEV-S-045 (muestra de suelo -> firma de color azul) y SEV-C-047 (muestra de hojas de girasoles -> firma de color rojo), con la firma espectral de color verde correspondiente al mineral Cerusita (Figura 4.66), y se seleccionaron aquellas longitudes de onda absortivas-reflectivas y picos-valles con alta similitud.



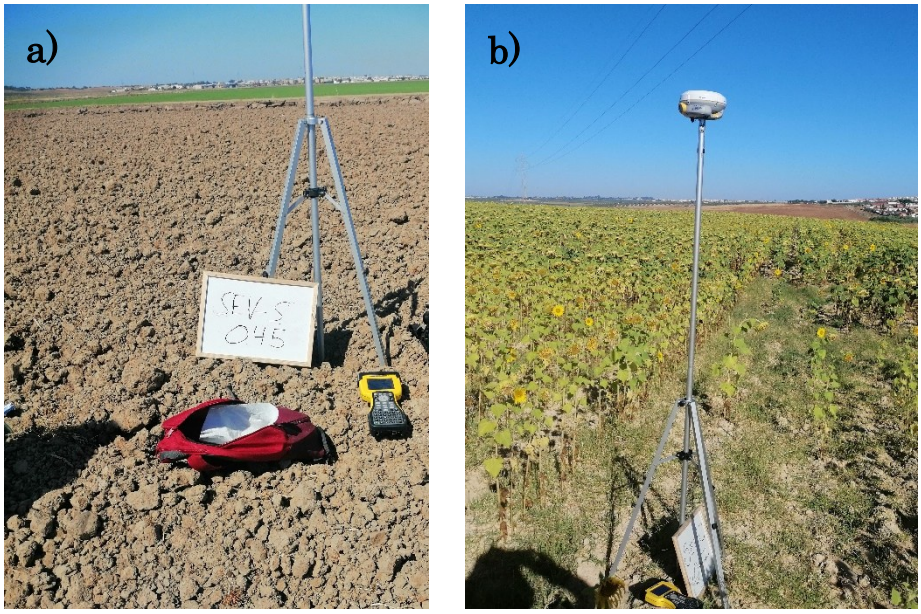


Figura 4.66: Firmas espectrales de suelo y vegetación para caracterización de Pb y sus correspondientes fotografías en campo: a) suelo; b) vegetación (girasol).

Adicionalmente, se compararon las firmas espectrales de las estaciones con mayor (SEV-S-027 -> firma de color rojo) y menor (MAD-S-002 -> firma de color azul) concentración de Pb, y aquella estación muestral seleccionada para la caracterización de Pb (SEV-S-045 -> firma de color verde), todas las muestras presentan una textura franco arenosa (Figura 4.67). La firma espectral de la estación con menor contenido de Pb exhibe una mayor reflectividad en toda la porción del espectro electromagnético analizado, y las otras 2 estaciones, presentan una disminución de reflectividad de 0,15 puntos aproximadamente.

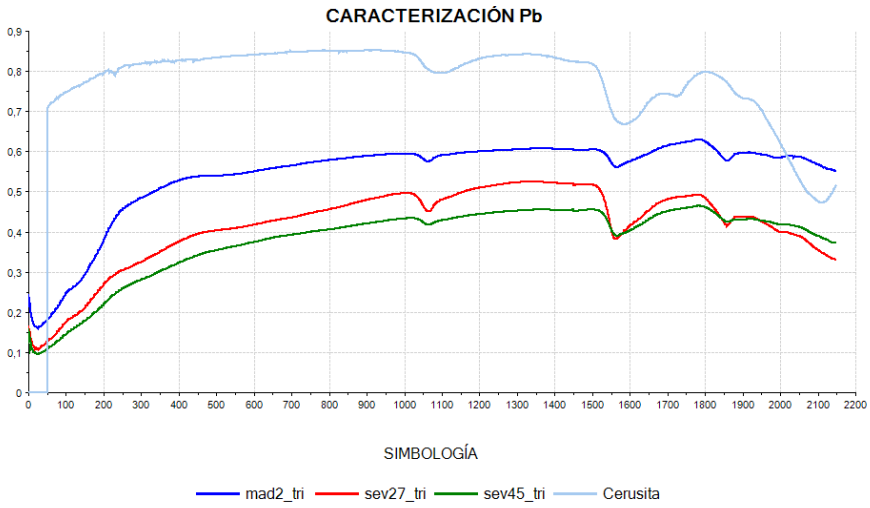


Figura 4.67: Firmas espectrales de suelo con diferente contenido de Pb.

A manera de ejemplo se presenta la comparativa entre la 1ª derivada de la hoja de cultivo de girasol (firma de color azul) versus su similar a partir del mineral Cerusita (firma de color rojo), evidenciándose una alta similitud desde los 1.400 nm en adelante (Figura 4.68).

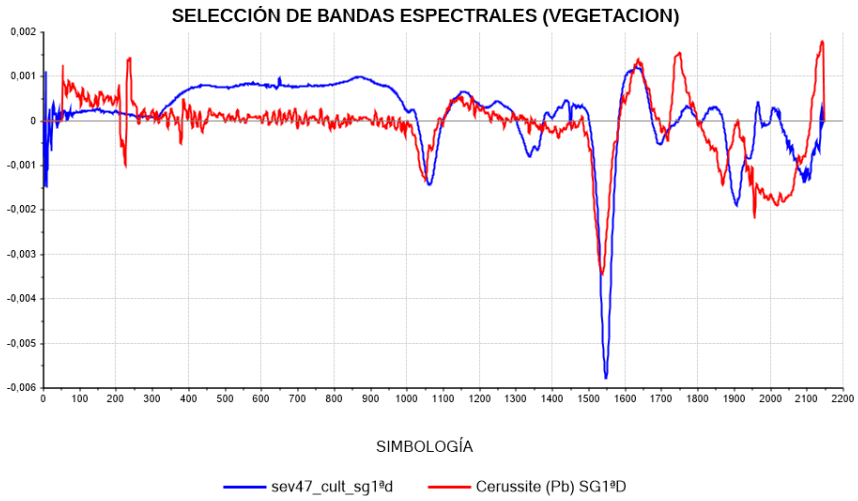


Figura 4.68: Contraste de la 1ª derivada de la firma espectral de la hoja de cultivo de girasol (SEV-C-047) con la 1ª derivada de la Cerusita.

En función de lo mencionado se seleccionaron aquellas bandas con alto contraste espectral absortivo y reflectivo a partir de las firmas base (Tabla 4.31). De manera similar, se realizó la selección de longitudes de onda empleando las diferentes transformaciones, tanto para el suelo como para la vegetación (Tabla 4.32), y a partir de las correlaciones entre las firmas y las analíticas (Tabla 4.33).

Tabla 4.31: Caracterización de Pb a partir de las firmas espectrales base.

Firma espectral	Tipo	λ (nm) central	Ancho (nm)	Profundidad (Δ Reflectividad)	Simetría
SEV-S-045 _ tri (SUELO)	Absortivo	1414**	1396-1442	ρ_1 = 0,42644 ρ_2 = 0,41687 ρ_1-ρ_2 = 0,00957	Simétrico
	Absortivo	1915*	1870-2051	ρ_1 = 0,45150 ρ_2 = 0,39033 ρ_1-ρ_2 = 0,06117	Asimetría +
	Reflectivo	2134*	1998-2204	ρ_1 = 0,46441 ρ_2 = 0,42569 ρ_1-ρ_2 = 0,03872	Asimetría -
SEV-C-047 (VEGETACIÓN)	Absortivo	1448*	1390-1565	ρ_1 = 0,58692 ρ_2 = 0,53478 ρ_1-ρ_2 = 0,05214	Asimetría +
	Absortivo	1933*	1902-2014	ρ_1 = 0,47012 ρ_2 = 0,39287 ρ_1-ρ_2 = 0,07725	Simétrico
	Reflectivo	2025**	1999-2065	ρ_1 = 0,47298 ρ_2 = 0,45834 ρ_1-ρ_2 = 0,01464	Asimetría +

*Banda con alto contraste espectral y desplazamiento menor a 20 nm referente al espectro puro;
**Bandas con alto contraste espectral y desplazamiento entre 20 a 50 nm referente al espectro puro

Tabla 4.32: Selección de bandas espectrales sensibles al contenido de Pb a partir de las transformaciones de las firmas espectrales.

Tipo	Suelo (SEV-S-045 _ tri)		Vegetación (SEV-C-047)	
	λ (nm) - Pico	λ (nm) - Valle	λ (nm) - Pico	λ (nm) - Valle
Detrend	---	611**	---	1461**
	---	1415*	1854*	1932*
	1850*	1915*	2034**	2065*
	2140**	2208**	2228**	2305**
	2315**	---	---	---
1ª derivada	550**	609*	---	609*
	---	1402*	---	1412*
	1424*	---	1502**	1689*
	1810**	1897*	1788**	1898*
	1996*	2189**	1981*	2049*
	2219**	---	2120*	2257**
2ª derivada	---	608*	---	1884**
	612*	---	1909*	---
	1414*	1890**	2306*	---
	1908*	2234**	---	---

*Banda con alto contraste espectral y desplazamiento menor a 20 nm referente a las transformadas;
**Bandas con alto contraste espectral y desplazamiento entre 20 a 50 nm referente a las transformadas

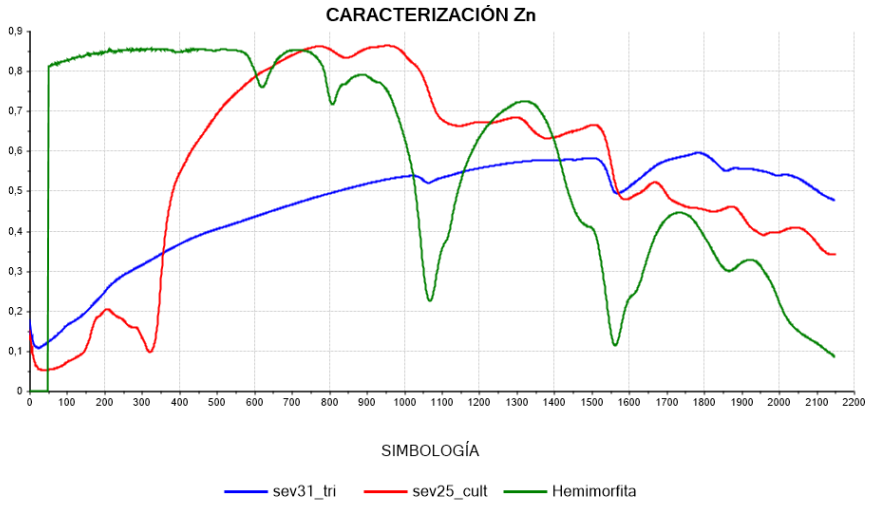
Tabla 4.33: Selección de longitudes de onda sensibles al contenido de Pb empleando la correlación entre firmas espectrales y analíticas.

Tipo	Suelo (triturado)		Vegetación	
	λ (nm)	%	λ (nm)	%
Base	1071	-54,1	1783	-48,3
	1593	-50,9	2012	-49,2
1ª derivada	1408	39,7	563	-43,0
	1659	-41,6	1723	59,6
	2043	-47,0	2193	44,5
	2420	44,7	2350	-53,7
2ª derivada	651	-54,1	407	-79,3
	708	-50,5	921	79,7
	730	55,8	1347	75,2
	820	-52,0	1658	70,5
	975	56,2	2127	-77,2
	1720	49,9	2348	-80,8

h. Zn

Sun et al. (2017) mencionan que, las bandas de absorción alrededor de 410 nm y entre los 600 a 800 nm, presentan una alta correlación entre el contenido de Zn en suelo y la materia orgánica, por otro lado, los picos de absorción 1.400, 1.900 y 2.200 nm se asocian con minerales arcillosos.

El proceso de caracterización fue realizado a partir de las estaciones muestrales SEV-S-031 (firma de color azul) y SEV-C-025 (firma de color rojo), correspondientes a suelo y vegetación (tomate) respectivamente, confrontadas de manera independiente con el espectro puro del mineral Hemimorfita (firma de color verde), corroborando picos de absorción-reflexión causados por la presencia de Zn (Figura 4.69).



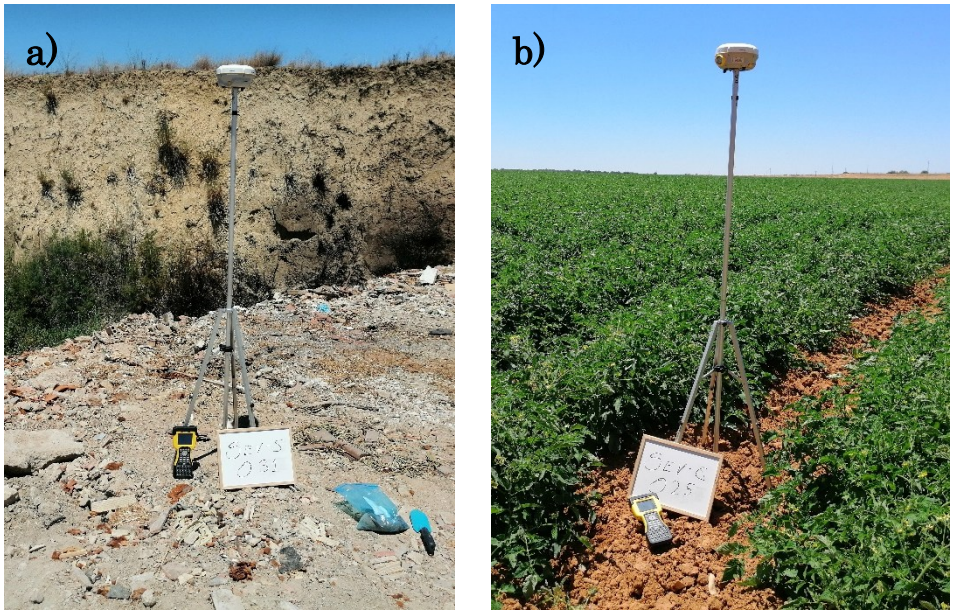


Figura 4.69: Firmas espectrales de suelo y vegetación para caracterización de Zn y sus correspondientes fotografías en campo: a) suelo; b) vegetación (tomate).

Se realizó una comparativa entre las estaciones muestrales con la mayor (SEV-S-027 -> firma de color rojo) y menor (MAD-S-001 -> firma de color azul) concentración de Zn en suelo, y aquella estación muestral seleccionada con contenido de Zn por encima del límite permisible (SEV-S-031 -> firma de color verde), de textura que varía entre areno francoso y franco arenoso (Figura 4.70). Dentro de las regiones del VIS y NIR se presenta una alta reflectividad por parte de la estación con menor contenido de Zn en comparación con las otras firmas. Sin embargo, a partir de los 1850 nm existe una disminución considerable de la reflectividad, al igual que sucede con la firma de la Hemimorfita.

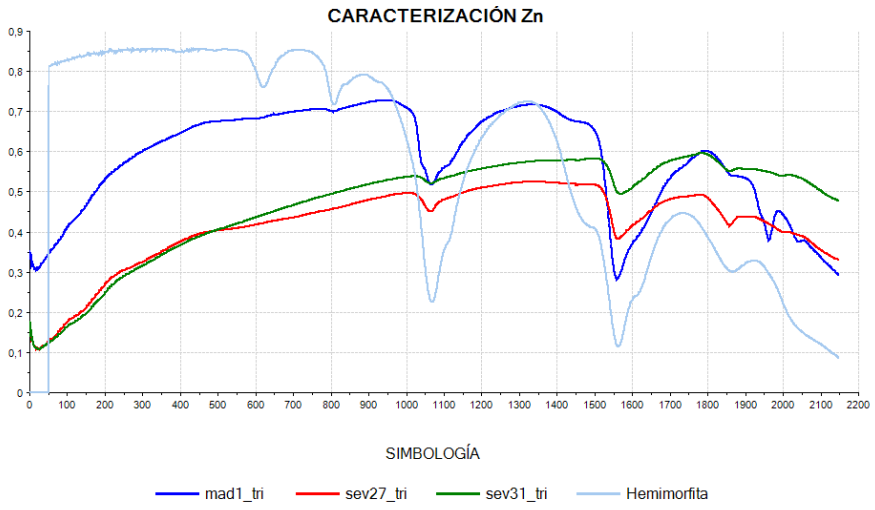


Figura 4.70: Firmas espectrales de suelo con diferente contenido de Zn.

A continuación, se presenta la 1ª derivada de suelo triturado (firma de color azul) versus la 1ª derivada de la Hemimorfita (firma de color rojo), pudiendo evidenciar aquellos picos-valles con alta similitud entre ambas firmas espectrales (Figura 4.71).

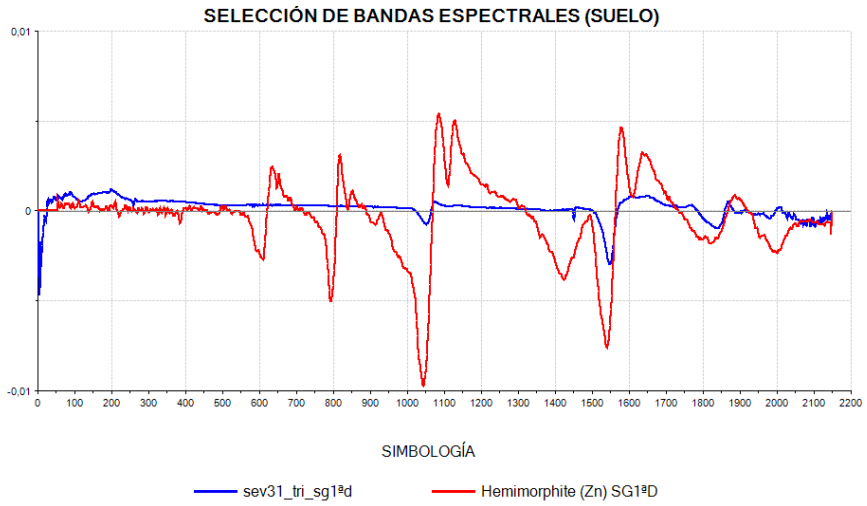


Figura 4.71: Contraste de la 1ª derivada de la firma espectral de suelo triturado (SEV-S-031) con la 1ª derivada de la Hemimorfita.

Adicionalmente, se seleccionaron las bandas espectrales a partir de los diferentes procesos ejecutados, los cuales fueron comparados son sus símiles provenientes del espectro de la Hemimorfita, permitiendo de esta forma identificar al metal pesado en cuestión (Tabla 4.34, Tabla 4.35 y Tabla 4.36).

Tabla 4.34: Caracterización de Zn a partir de las firmas espectrales base.

Firma espectral	Tipo	λ (nm) central	Ancho (nm)	Profundidad (Δ Reflectividad)	Simetría
SEV-S-031 _ tri (SUELO)	Absortivo	1414*	1383-1458	ρ_1 = 0,53699 ρ_2 = 0,52025 ρ_1-ρ_2 = 0,01674	Asimetría +
	Absortivo	1918*	1865-2055	ρ_1 = 0,58043 ρ_2 = 0,49450 ρ_1-ρ_2 = 0,08593	Asimetría +
	Reflectivo	2134**	2004-2204	ρ_1 = 0,59571 ρ_2 = 0,55166 ρ_1-ρ_2 = 0,04405	Asimetría -
	Absortivo	2208*	2197-2226	ρ_1 = 0,55662 ρ_2 = 0,55040 ρ_1-ρ_2 = 0,00622	Asimetría +
SEV-C-025 (VEGETACIÓN)	Absortivo	1194**	1144-1253	ρ_1 = 0,85731 ρ_2 = 0,83348 ρ_1-ρ_2 = 0,02383	Simétrico
	Reflectivo	1648*	1590-1676	ρ_1 = 0,68478 ρ_2 = 0,67147 ρ_1-ρ_2 = 0,01331	Asimetría -
	Absortivo	1940**	1912-2012	ρ_1 = 0,52064 ρ_2 = 0,47863 ρ_1-ρ_2 = 0,04201	Asimetría +
	Reflectivo	2224**	2183-2244	ρ_1 = 0,46165 ρ_2 = 0,44855 ρ_1-ρ_2 = 0,0131	Asimetría -

*Banda con alto contraste espectral y desplazamiento menor a 20 nm referente al espectro puro;
**Bandas con alto contraste espectral y desplazamiento entre 20 a 50 nm referente al espectro puro

Tabla 4.35: Selección de bandas espectrales sensibles al contenido de Zn a partir de las transformaciones de las firmas espectrales.

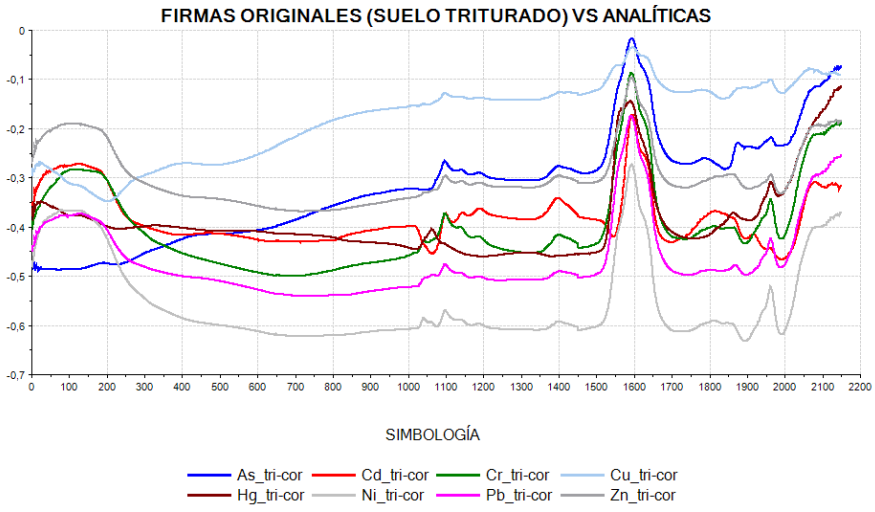
Tipo	Suelo (SEV-S-031 _ tri)		Vegetación (SEV-C-025)	
	λ (nm) - Pico	λ (nm) - Valle	λ (nm) - Pico	λ (nm) - Valle
Detrend	---	1416*	---	1207**
	---	1918*	1252*	---
	2140**	2207*	1654**	1934**
1ª derivada	---	1401*	---	1163*
	1424*	1898*	1222**	1416**
	1995*	2191*	---	1901*
	2219*	2331*	1994*	2339*
2ª derivada	---	1388*	---	1403**
	1414*	1890**	1436**	1884**
	1908*	---	1911*	---
	---	---	2051*	---

*Banda con alto contraste espectral y desplazamiento menor a 20 nm referente a las transformadas;
**Bandas con alto contraste espectral y desplazamiento entre 20 a 50 nm referente a las transformadas

Tabla 4.36: Selección de longitudes de onda sensibles al contenido de Zn empleando la correlación entre firmas espectrales y analíticas.

Tipo	Suelo (triturado)		Vegetación	
	λ (nm)	%	λ (nm)	%
Base	1065	-36,9	1454	65,4
	2338	-33,3	1777	62,6
1ª derivada	550	-32,5	734	51,3
	614	-33,2	1512	-65.4
	2381	28,6	2159	-57,7
	2419	32,4	2226	48,4
2ª derivada	628	44,0	693	70,5
	707	-44,4	834	-63,7
	899	-53,7	975	-66,3
	975	48,2	1040	78,1
	1791	-43,4	1554	-72,1
	2256	43,9	1605	74,8

De manera general, las firmas espectrales de suelo presentan correlaciones negativas con respecto a las analíticas. El As exhibe la mayor correlación en el rango del visible, y el Ni en los infrarrojos cercano y de onda corta. Se evidencian picos de baja (≈ 1.945 nm) y alta correlación (≈ 2.345 nm) predominantes. Por otro lado, la correlación realizada entre las firmas espectrales de los cultivos y sus respectivas analíticas, presentan una gran variabilidad, teniendo el As la correlación más alta-positiva en las regiones del visible e infrarrojo cercano y la más alta-negativa a partir de los 2.000 nm en adelante, sin embargo, firmas como el Zn y Pb, muestran correlaciones por encima del 50% en diferentes porciones del espectro estudiado (Figura 4.72).



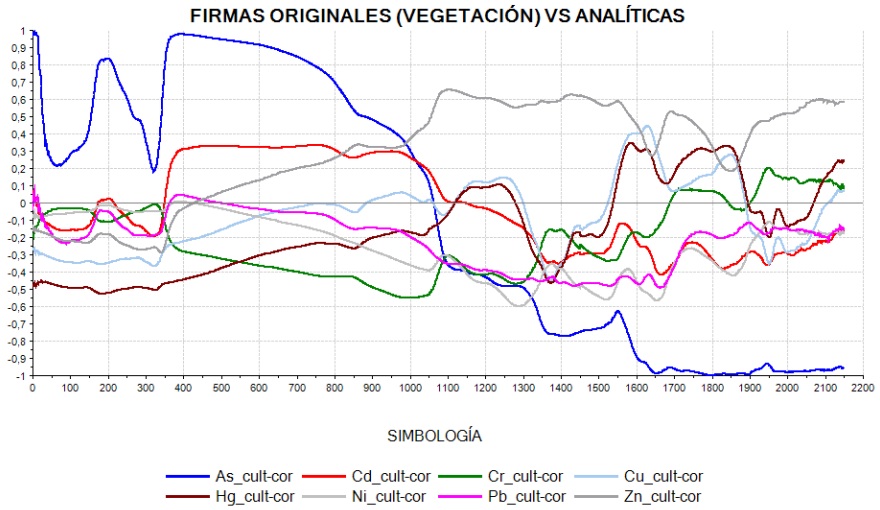


Figura 4.72: Correlaciones entre las firmas espectrales de suelo (superior) y vegetación (inferior) versus las analíticas.

Adicionalmente, se realizó una selección de bandas espectrales mediante un enfoque supervisado empleando el *software* Weka, con la finalidad de eliminar longitudes de onda redundantes o irrelevantes que podrían estar presentes en los datos base.

En primera instancia se definió el procedimiento para seleccionar el subconjunto de atributos, el cual se divide en: método filtro, en donde los atributos seleccionados son evaluados en función de las características generales de los datos, y, método *wrapper*, el cual emplea un clasificador para la evaluación del subconjunto de atributos, en donde la calidad de la selección realizada se define por la capacidad predictiva del clasificador empleado.

En segunda instancia se efectuó el control del espacio de búsqueda, debido a que el número de subconjuntos posibles de atributos es exponencial sobre el número total de atributos. Este proceso está en función del puntaje o la métrica seleccionada de evaluación de los subconjuntos de datos, el cual puede significar una condición de parada del algoritmo.

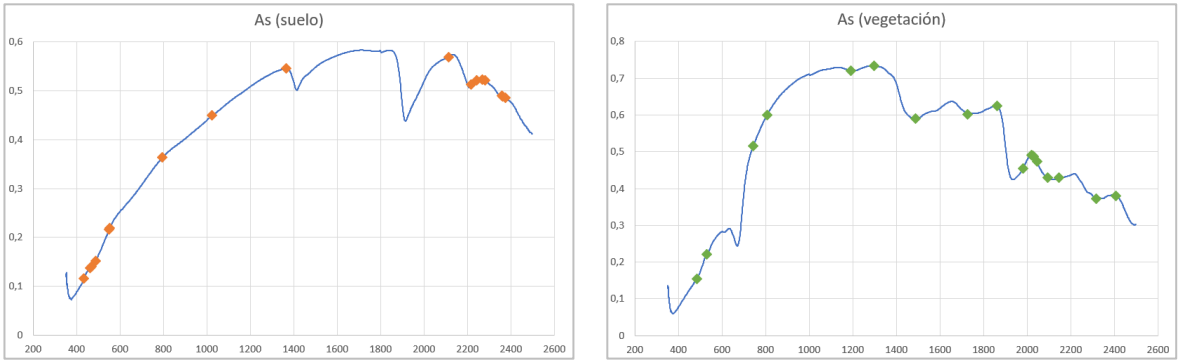
Para la presente investigación se trabajó con el método *wrapper*, empleando múltiples clasificadores (*additive regression*, *random forest*, *linear regression*, etc.), y, con la estrategia *best-first search*, para controlar el espacio de búsqueda. Cabe indicar que, la métrica de evaluación empleada fue el coeficiente de correlación (mérito), el cual fluctúa entre -1 y 1 y permite la comparación con otros clasificadores (Eibe, 2023).

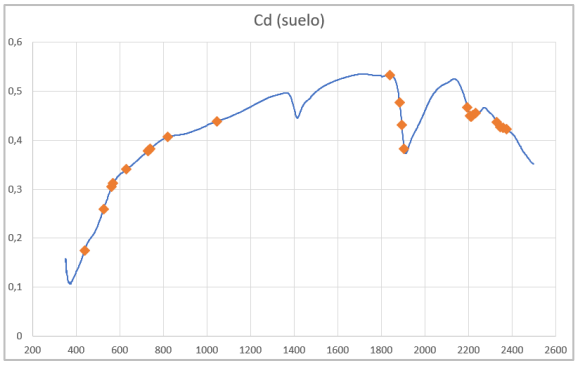
En función de lo mencionado se presenta a continuación los resultados obtenidos a partir de los clasificadores con mejor puntaje de correlación y distribución de datos (Tabla 4.37):

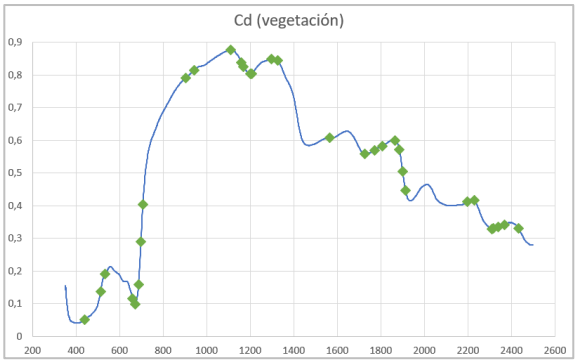
Tabla 4.37: Selección de bandas espectrales mediante el uso de múltiples clasificadores dentro del *software* Weka.

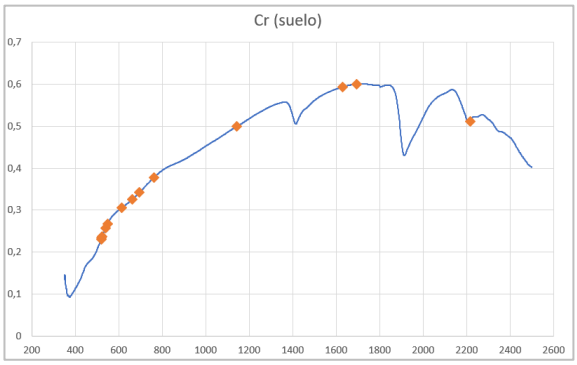
Metal	Material	Clasificador	Mérito	Bandas espectrales
As	Suelo	*Locally Weighted Learning* (LWL)	0.784	469; 489; 551; 554; 1025; 2112
	Vegetación	---	---	---
Cd	Suelo	*Random tree*	0.647	526; 563; 570; 631; 731; 738; 739
	Vegetación	*Random tree*	0.982	441; 905; 942; 1325; 1806; 2432
Cr	Suelo	*Random tree*	0.688	519; 522; 662; 1631; 1695
	Vegetación	*Random tree*	0.810	976; 2264; 2265; 2357
Cu	Suelo	*Decision table*	0.550	433; 484; 1325; 1499; 1584; 1621; 1716; 1717; 1745; 1768; 2017
	Vegetación	*Random tree*	0.977	526; 716; 1362; 1495
Hg	Suelo	LWL	0.827	529; 2025; 2056; 2057; 2120
	Vegetación	LWL	0.907	528; 533; 731; 733; 1020; 1360
Ni	Suelo	*Random tree*	0.865	635; 644; 649; 839; 2176
	Vegetación	*Random committee*	0.929	509; 702; 1689; 1946; 2427; 2430
Pb	Suelo	LWL	0.787	647; 676; 714; 721; 728; 736; 739; 748
	Vegetación	LWL	0.892	510; 1405; 1756; 1920; 2418; 2419
Zn	Suelo	*Random subspace*	0.737	495; 564; 598; 605; 613; 646; 1133; 1142; 1179; 1836
	Vegetación	LWL	0.793	418; 483; 496; 497; 499; 501; 966; 1053; 1429; 1735; 1898; 2010; 2190

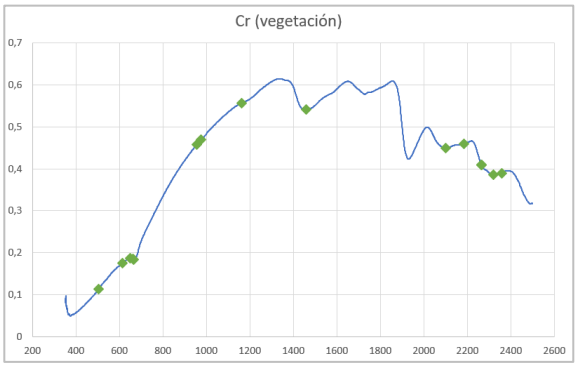
A partir de lo realizado bajo este apartado, se presenta dentro de la Figura 4.73 un resumen del proceso de caracterización y selección de bandas espectrales que tienen mayor incidencia dentro de cada uno de los elementos traza estudiados. Para esto se empleó como base las firmas espectrales de las estaciones muestrales seleccionadas, tanto en suelo como en vegetación.

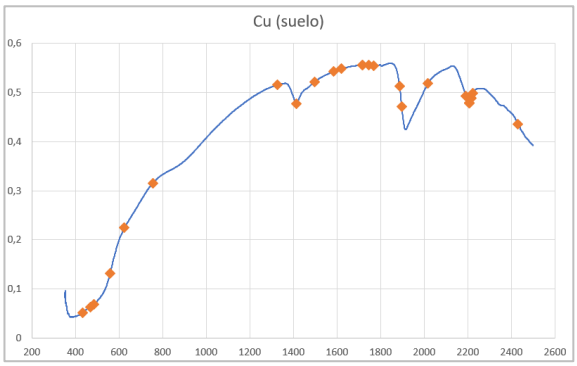


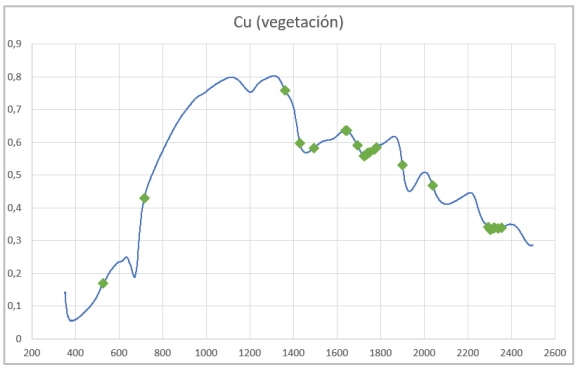

Cd (suelo)
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0
200 400 600 800 1000 1200 1400 1600 1800 2000 2200 2400 2600

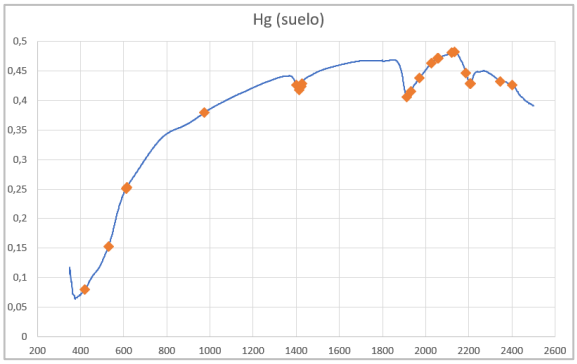

Cd (vegetación)
0,9
0,8
0,7
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0
200 400 600 800 1000 1200 1400 1600 1800 2000 2200 2400 2600

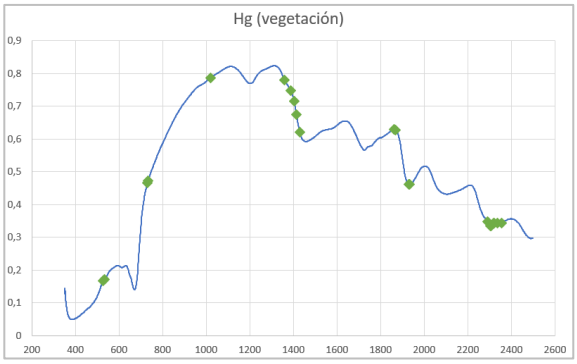

Cr (suelo)
0,7
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0
200 400 600 800 1000 1200 1400 1600 1800 2000 2200 2400 2600


Cr (vegetación)
0,7
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0
200 400 600 800 1000 1200 1400 1600 1800 2000 2200 2400 2600


Cu (suelo)
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0
200 400 600 800 1000 1200 1400 1600 1800 2000 2200 2400 2600


Cu (vegetación)
0,9
0,8
0,7
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0
200 400 600 800 1000 1200 1400 1600 1800 2000 2200 2400 2600


Hg (suelo)
0,5
0,45
0,4
0,35
0,3
0,25
0,2
0,15
0,1
0,05
0
200 400 600 800 1000 1200 1400 1600 1800 2000 2200 2400 2600


Hg (vegetación)
0,9
0,8
0,7
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0
200 400 600 800 1000 1200 1400 1600 1800 2000 2200 2400 2600

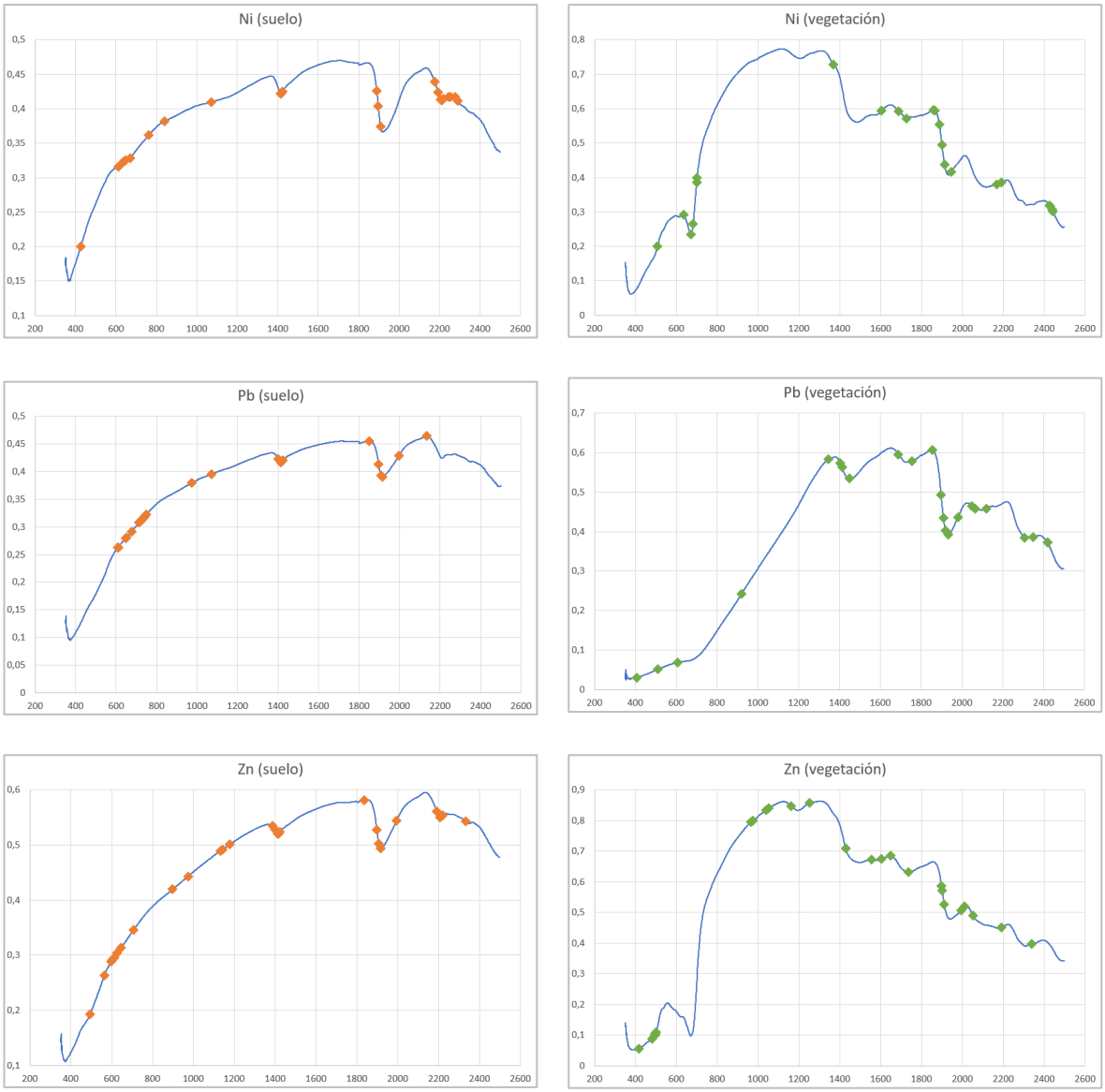


Figura 4.73: Resumen de bandas espectrales seleccionadas.

4.6.2. Localización geoespacial de elementos traza mediante transformaciones de imágenes

a. Técnica de Crósta

- Sentinel-2

A continuación, se presentan las longitudes de onda que mantienen una analogía con las bandas espectrales de Sentinel-2. Dichas longitudes de onda fueron derivadas a partir de los diferentes procesos de selección de bandas espectrales. Existen longitudes de onda que caracterizan a más de un elemento

traza, sin embargo, y debido al limitado número de bandas que posee Sentinel-2, se ha conservado a dichas longitudes dentro del presente análisis (Tabla 4.38).

Tabla 4.38: Longitudes de onda sensibles al contenido de elementos traza en suelo y vegetación, análogas con las bandas espectrales de Sentinel-2.

λ (nm)	Proceso	S-2	λ (nm)	Proceso	S-2
As (suelo)			**As (vegetación)**		
434 R	1ª derivada	B1	484 R	Correlación (2ª)	B2
463 A	1ª derivada	B2	743 R	Correlación (B)	B6
469	Weka	B2	807 R	Correlación (2ª)	B8
489	Weka	B2	2147 A	Correlación (B)	B12
551	Weka	B3			
554	Weka	B3			
796 A	Correlación (2ª)	B8			
2112	Weka	B12			
2217 A	Correlación (2ª)	B12			
2243 R	Correlación (2ª)	B12			
2267	Base	B12			
Cd (suelo)			**Cd (vegetación)**		
439 R	1ª derivada	B1	441	Weka	B1
563	Weka	B3	513 R	Correlación (2ª)	B2
570	Weka	B3	660 A	1ª derivada	B4
738	Weka	B6	673 A	*Detrend*	B4
739	Weka	B6	698 R	1ª derivada	B5
820 A	Correlación (2ª)	B8	707 A	2ª derivada	B5
2195 A	1ª derivada	B12	942	Weka	B9
2208 R	2ª derivada	B12	1565 A	1ª derivada	B11
2210 A	*Detrend*	B12	2196 R	1ª derivada	B12
2212 A	Base	B12	2230 A	2ª derivada	B12
2219 R	1ª derivada	B12			
2233 R	Correlación (2ª)	B12			
Cr (suelo)			**Cr (vegetación)**		
519	Weka	B2	504 R	1ª derivada	B2
522	Weka	B2	650 R	Base	B4
549 R	1ª derivada	B3	661 A	1ª derivada	B4
662	Weka	B4	667 A	Base	B4
1631	Weka	B11	957 R	Correlación (2ª)	B9
2215 A	Correlación (2ª)	B12	2185 A	Correlación (2ª)	B12
			2264 R	Correlación (2ª)	B12
			2265	Weka	B12
Cu (suelo)			**Cu (vegetación)**		
433	Weka	B1	526	Weka	B2
469 A	1ª derivada	B2	716	Weka	B5
484	Weka	B2	1640 R	Base	B11

λ (nm)	Proceso	S-2	λ (nm)	Proceso	S-2
559 R	Correlación (2ª)	B3	1646 R	*Detrend*	B11
755 A	Correlación (2ª)	B6	2295 A	Correlación (1ª)	B12
1584	Weka	B11			
1621	Weka	B11			
2192 A	1ª derivada	B12			
2206 A	*Detrend*	B12			
2207 A	Base	B12			
2208 R	2ª derivada	B12			
2217 R	1ª derivada	B12			
2223 A	2ª derivada	B12			
Hg (suelo)			**Hg (vegetación)**		
420 A	Correlación (2ª)	B1	528	Weka	B2
529	Weka	B2	533	Weka	B3
975 R	Correlación (2ª)	B9	733	Weka	B6
2120	Weka	B12	2292 A	Correlación (1ª)	B12
2133 R	Base	B12			
2187 A	1ª derivada	B12			
2206 A	*Detrend*	B12			
2207 A	Base	B12			
2208 R	2ª derivada	B12			
Ni (suelo)			**Ni (vegetación)**		
425 A	2ª derivada	B1	509	Weka	B2
671 A	*Detrend*	B4	673 A	*Detrend*	B4
839	Weka	B8	700 A	2ª derivada	B5
2176	Weka	B12	702	Weka	B5
2193 A	1ª derivada	B12	1605 R	1ª derivada	B11
2207 R	2ª derivada	B12	2168 A	Correlación (2ª)	B12
2209 A	*Detrend*	B12	2190 R	Correlación (2ª)	B12
2211 A	Base	B12			
2219 R	1ª derivada	B12			
2245 A	Correlación (B)	B12			
2256 R	Correlación (2ª)	B12			
2277 R	*Detrend*	B12			
Pb (suelo)			**Pb (vegetación)**		
651 A	Correlación (2ª)	B4	407 A	Correlación (2ª)	B1
676	Weka	B4	510	Weka	B2
714	Weka	B5	921 R	Correlación (2ª)	B8
736	Weka	B6	1689 A	1ª derivada	B11
739	Weka	B6	2120 R	1ª derivada	B12
748	Weka	B6			
2134 R	Base	B12			
Zn (suelo)			**Zn (vegetación)**		
495	Weka	B2	483	Weka	B2
564	Weka	B3	496	Weka	B2
707 A	Correlación (2ª)	B5	497	Weka	B2

λ (nm)	Proceso	S-2	λ (nm)	Proceso	S-2
899 [A]	Correlación (2ª)	B8	499	Weka	B2
2191 [A]	1ª derivada	B12	501	Weka	B2
2207 [A]	*Detrend*	B12	966	Weka	B9
2208 [A]	Base	B12	1605 [R]	Correlación (2ª)	B11
2219 [R]	1ª derivada	B12	1648 [R]	Base	B11
			2190	Weka	B12

[A] Banda absortiva, valle, correlación negativa; [R] Banda reflectiva, pico, correlación positiva

En la Tabla 4.39 se presenta un resumen de aquellas bandas espectrales de Sentinel-2 empleadas en el proceso de ACP, por cada uno de los elementos traza y superficie (suelo y vegetación), adicionalmente, se realiza una comparativa con aquellas bandas espectrales seleccionadas dentro del apartado de aproximación inicial.

Tabla 4.39: Selección de bandas espectrales por cada metal pesado y comparativa con bandas seleccionadas en la aproximación inicial.

	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Aproximación inicial	B1 [A/*] B5 [R/*] B8 [A] B12 [R]	B4 [A/*] B7 [R] B8 [A] B12 [R/*]	B3 [R/*] B4 [A/*] B8A [R] B12 [A]	B4 [A] B6 [R] B11 [A/*] B12 [R/*]	B7 [R/*] B8A [A/*] B11 [R] B12 [A]	B8A [A] B9 [R] B11 [A/*] B12 [R/*]	B3 [A/*] B5 [R/*] B6 [A] B12 [R]	B4 [R] B6 [A] B11 [R/*] B12 [A/*]
Caracterización (suelo)	B2 [A] B3 [-] B8 [A] B12 [R]	B3 [-] B6 [-] B8 [A] B12 [A]	B2 [-] B3 [R] B4 [-] B11 [-]	B2 [A] B3 [R] B11 [-] B12 [A]	B1 [A] B2 [-] B9 [R] B12 [A]	B1 [A] B4 [A] B8 [-] B12 [R]	B4 [A] B5 [-] B6 [-] B12 [R]	B3 [-] B5 [A] B8 [A] B12 [R]
Caracterización (vegetación)	B2 [R] B6 [R] B8 [R] B12 [A]	B2 [R] B4 [A] B5 [R] B12 [A]	B2 [R] B4 [A] B9 [R] B12 [A]	B2 [-] B5 [-] B11 [R] B12 [A]	B2 [-] B3 [-] B6 [-] B12 [A]	B4 [A] B5 [A] B11 [R] B12 [R]	B2 [-] B8 [R] B11 [A] B12 [R]	B2 [-] B9 [-] B11 [R] B12 [-]

*Bandas Sentinel-2 con mayor contraste espectral; [-] Bandas seleccionadas mediante software Weka; [A] Banda absortiva, valle, correlación negativa; [R] Banda reflectiva, pico, correlación positiva

Como se puede verificar en la Tabla 4.39, las bandas espectrales ubicadas en la región del infrarrojo de onda corta se han conservado, adicionalmente, se puede mencionar que los cambios de bandas que se han producido se deben principalmente a que las firmas espectrales provienen de materiales heterogéneos, a diferencia de los espectros puros de minerales analizados previamente, siendo estos poco común encontrarlos de manera directa en la naturaleza.

Posteriormente, se realizó la descarga de las imágenes Sentinel-2 desde la página oficial del programa Copernicus, mismas que poseen una versión de

procesamiento 5.0. A continuación, se presenta una tabla que resume las fechas que datan las imágenes utilizadas en la aproximación inicial, la campaña de campo y las imágenes empleadas en esta última fase de localización geoespacial de elementos traza, siendo la fecha de estas últimas imágenes lo más próximo a la salida de campo (Tabla 4.40).

Tabla 4.40: Comparación de fechas de imágenes empleadas y campaña de campo.

	Aproximación inicial	Campaña de campo	Localización geoespacial
PRS	03/01/2021 (S2B)	23/06/2021	27/06/2021 (S2A)
RG	16/05/2021 (S2A)	28/06/2021 al 02/07/2021	30/06/2021 (S2A)

Con las imágenes indicadas se realizó el resampleo a 10 m, y se transformó de números digitales a reflectividad mediante el uso del valor aditivo implementado a partir de la versión de procesamiento 4.0, el cual es de -1.000, y el resultado de esta operación se lo divide para el valor de cuantificación de 10.000 (ESA, 2024d).

Por otro lado, se enmascararon las superficies de vegetación y no vegetación (suelo, agua, construcciones, etc.), haciendo uso del índice espectral NDVI, esto con la finalidad de aplicar los diferentes algoritmos para detección de elementos traza, en superficies independientes, evitando posibles falsos positivos que se puedan originar al momento de realizar la detección.

De manera similar a lo realizado en la aproximación inicial de metales pesados, se seleccionó la CP en función del análisis de la matriz de autovectores, y a posteriormente, se realizó una clasificación no supervisada *k-means*, obteniendo 2 clases de escala relativa, las cuales reflejan la ausencia y presencia del elemento traza estudiado, en suelo y vegetación (Tabla 4.41).

Tabla 4.41: CP seleccionadas a partir de Crósta y bandas Sentinel-2 de mayor contraste.

	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Caracterización (suelo) - PRS	CP4	CP3	CP4	CP3	CP4	CP4	CP4	CP4
	-B2 +B3	+B3 -B12	+B2 -B3	-B11 +B12	-B1 +B2	+B1 -B4	+B4 -B5	+B3 -B5
Caracterización (vegetación) - PRS	CP4	CP3	CP4	CP4	CP4	CP4	CP4	CP4
	-B6 +B8	+B2 -B5	+B2 -B4	-B11 +B12	+B2 -B3	+B4 -B5	+B11 -B12	+B11 -B12
	CP4	CP3	CP4	CP3	CP4	CP4	CP4	CP4

	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Caracterización (suelo) - RG	+B2 -B3	+B3 -B12	-B2 +B3	-B11 +B12	+B1 -B2	+B1 -B4	+B4 -B5	+B3 -B5
Caracterización (vegetación) - RG	CP4	CP3	CP4	CP3	CP4	CP4	CP4	CP4
	-B6 +B8	+B2 -B5	+B2 -B4	-B5 +B12	+B2 -B3	+B4 -B5	+B11 -B12	-B11 +B12

- Autovector de signo negativo; + Autovector de signo positivo

Los estudios realizados sobre la técnica de Crósta definen previamente, bandas de mayor contraste espectral en función de la composición química, lo cual es útil para saber si los objetos de interés se presentan oscuros o brillantes dentro de la CP seleccionada. Sin embargo, dentro del presente estudio, al caracterizar los elementos traza a partir de diferentes transformaciones o métodos de selección, se desconoce si el objeto de estudio obtendrá una característica brillosa u obscura dentro de la CP, en función de esto, se optó por aplicar a todas las CP seleccionadas un factor multiplicativo de -1, lo cual fue validado con las muestras tomadas en las campañas de campo.

- PRISMA

Las imágenes hiperespectrales permiten afinar y/o mejorar el método empleado en el presente documento, por lo cual se realizó un proceso homólogo sobre las imágenes PRISMA, proporcionadas por la ASI, la cual posee 234 bandas espectrales. En función de esto, y como primer paso, se realizó la analogía respectiva entre las bandas espectrales seleccionadas en el proceso de caracterización y los canales que posee la imagen PRISMA, evidenciando el resultado en la Tabla 4.42.

Tabla 4.42: Longitudes de onda sensibles al contenido de elementos traza en suelo y vegetación, análogas con las bandas espectrales de PRISMA.

Metal	Material	Bandas espectrales análogas
As	Suelo	B12; B20; B46; B202
	Vegetación	B41; B98; B174; B208
Cd	Suelo	B5; B75; B195; B214
	Vegetación	B15; B90; B123; B216
Cr	Suelo	B16; B20; B136; B195
	Vegetación	B14; B86; B113; B214
Cu	Suelo	B21; B42; B138; B192
	Vegetación	B104; B131; B173; B209
Hg	Suelo	B17; B110; B176; B220
	Vegetación	B17; B40; B108; B207

Metal	Material	Bandas espectrales análogas
Ni	Suelo	B50; B190; B199; B205
	Vegetación	B30; B37; B189; B224
Pb	Suelo	B27; B31; B38; B185
	Vegetación	B27; B108; B142; B183
Zn	Suelo	B31; B83; B168; B192
	Vegetación	B86; B94; B122; B168

A pesar de que existe un mayor número de bandas que pueden ser seleccionadas para la aplicación de la técnica Crósta, en la Tabla 4.42 se escogieron aquellas longitudes de onda centrales con mayor proximidad a las bandas espectrales obtenidas en el proceso de caracterización. Adicionalmente, el proceso fue llevado a cabo en la zona de estudio RG, debido a que la imagen cubre 16 estaciones muestrales (42% de las estaciones ubicadas en RG), permitiendo de esta forma validar los resultados derivados.

Las imágenes PRISMA fueron obtenidas desde la página oficial de la ASI, mismas que poseen un nivel de procesamiento L2D (corrección geométrica y radiométrica). Para acceder a dichas imágenes se firmó una licencia de prestación de productos.

Es de importancia mencionar que, desde la banda 149 a la 164 existe presencia de ruido, por ende, no se consideró la utilización de dichos canales. Adicionalmente, se evidencia problemas en la ubicación espacial de la imagen, lo cual fue solucionado empleando una georreferenciación, tomando como base la imagen Sentinel-2, obteniendo un error medio cuadrático (RMSE, por sus siglas en inglés) de 2,78 unidades de pixel, previamente se realizó una extracción de las bandas espectrales de interés.

En función del análisis de las matrices de autovectores obtenidas a partir de la técnica Crósta, se seleccionaron las CP plasmadas en la Tabla 4.43.

Tabla 4.43: CP seleccionadas a partir de Crósta y bandas PRISMA de mayor contraste.

	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Caracterización (suelo) - RG	CP4	CP4	CP4	CP4	CP3	CP4	CP4	CP4
	+B12 -B20	-B195 +B214	-B16 +B20	-B138 +B192	-B176 +B220	-B190 +B199	-B27 +B31	-B168 +B192
Caracterización (vegetación) - RG	CP4	CP4	CP4	CP3	CP3	CP4	CP3	CP4
	-B174 +B208	-B123 +B216	-B113 +B214	-B173 +B209	-B17 +B40	-B30 +B37	+B27 -B142	+B86 -B94

- Autovector de signo negativo; + Autovector de signo positivo

b. NDSI

En base a las bandas espectrales de mayor contraste de la Tabla 4.43, se generaron índices de diferencia normalizada (Tabla 4.44), para las superficies de suelo y vegetación, los cuales fueron posteriormente clasificados de manera no supervisada mediante la técnica de *k-means*, obteniendo como resultado 2 clases: ausencia y presencia del metal pesado estudiado. De igual forma la aplicación de los índices espectrales se lo llevó a cabo en RG, debido a que se tiene un mayor número es estaciones muestrales en esta zona.

Tabla 4.44: Combinaciones de bandas Sentinel-2 empleadas en índices espectrales.

Bandas espectrales para suelo	Bandas espectrales para vegetación
As: B2-B3 / B2+B3	As: B8-B6 / B8+B6
Cd: B3-B12 / B3+B12	Cd: B2-B5 / B2+B5
Cr: B3-B2 / B3+B2	Cr: B2-B4 / B2+B4
Cu: B12-B11 / B12+B11	Cu: B12-B5 / B12+B5
Hg: B1-B2 / B1+B2	Hg: B2-B3 / B2+B3
Ni: B1-B4 / B1+B4	Ni: B4-B5 / B4+B5
Pb: B4-B5/B4+B5	Pb: B11-B12 / B11+B12
Zn: B3-B5 / B3+B5	Zn: B12-B11 / B12+B11

5. VALIDACIÓN DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

"Los problemas que parecen pequeños

son grandes problemas que aún no se entienden"

(Ramón y Cajal)

CONTENIDO:

5.1.	Diseño muestral verdad – terreno	161
5.2.	Métricas estadísticas	162
5.3.	Discusión	165

5.1. Diseño muestral verdad – terreno

Con la finalidad de validar los resultados obtenidos en el capítulo anterior, se generaron áreas de interés (ROIs, por sus siglas en inglés), para lo cual se digitalizaron aquellas zonas con presencia de metales pesados en función de los análisis químicos efectuados en el presente estudio.

Adicionalmente, para la digitalización de los ROIs se fraccionaron las imágenes descargadas, mediante la aplicación del algoritmo de segmentación de imágenes basada en objetos (Baatz & Schäpe, 2000), el cual evalúa la homogeneidad local basándose en las características espectrales y espaciales.

Dicha segmentación contempla el uso de los siguientes parámetros (Catalyst, 2024):

- Escala: tamaño de los objetos
- Forma: creación de objetos en función del color
- Compacidad: Creación de objetos compactos o suavizados

Para el caso de las imágenes Sentinel-2, se utilizaron los valores: 10, 0,1 y 0,6, respectivamente.

El último de los insumos empleados para la digitalización de las ROIs, fueron las 3 primeras CP de cada una de las imágenes especificadas anteriormente. Esto ayudó a definir con mejor precisión las áreas que serán empleadas en el presente proceso (Figura 5.1).

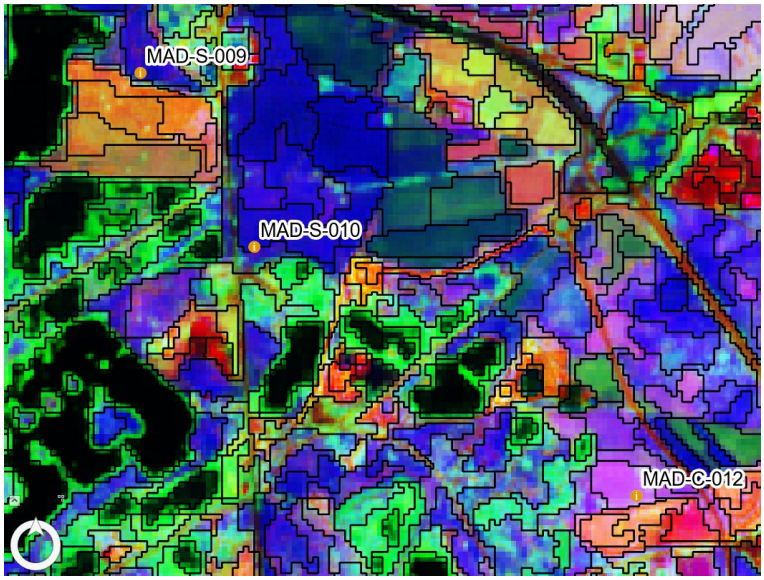


Figura 5.1: Ejemplo de obtención de regiones de validación en PRS.

Todas estas actividades fueron realizadas con la finalidad de evitar problemas de etiquetado incorrecto, ya que puede traer consecuencias negativas al momento de obtener los diferentes estadísticos producto de la validación realizada (N. Ghoggali et al., 2009).

Cabe indicar que, las muestras de validación de cada zona de estudio almacenarán 2 clases, la primera relacionada a la ausencia del elemento traza, esto quiere decir que, los valores de dicho metal se encuentran por debajo de la normativa empleada, y la segunda clase corresponde a la presencia, la cual contiene valores del elemento traza por encima de la normativa permisible.

Para el caso de aquellos metales pesados que no se encuentren normados en alimentos o vegetación, se definirán las clases en función del uso de cuartiles, aquellas zonas con valores por encima del tercer cuartil se determinarán como áreas con presencia del elemento traza y viceversa. Esto fue determinado mediante el análisis inter cuartil realizado a partir de los datos de metales pesados que si cuentan con normativa. En función de esto, se obtuvo el siguiente número de muestras (Tabla 5.1):

Tabla 5.1: Número de muestras de validación por localidad y por objetivo.

Objetivo	PRS	RG	Total
Suelo	12	23	35
Vegetación	5	9	14
Total	17	32	**49**

5.2. Métricas estadísticas

La comparación entre los valores de referencia (ROIs de validación) y los obtenidos a partir de las técnicas espectrométricas, fueron evaluadas mediante estadísticas provenientes de la matriz de confusión, entre las más comunes se encuentran la precisión global (OA, por sus siglas en inglés) (obtenida mediante la fracción entre las muestras correctamente clasificadas y el total de píxeles de la matriz de error), y el índice Kappa (mide la diferencia entre el acuerdo y el que cabría esperar mediante una asignación al azar, intentando delimitar el grado de ajuste debido sólo a la exactitud de la clasificación) (Cabrera-Torres & López García, 2016; Chuvieco, 2010; Congalton, 1991).

La fiabilidad de las técnicas espectrométricas empleadas en el presente estudio (técnica Crósta y NDSI), es detallada en la Tabla 5.2, Tabla 5.3 y Tabla 5.4:

Tabla 5.2: Validación de la técnica Crósta con imagen Sentinel-2.

Metal	PRS				RG			
	Suelo		Vegetación		Suelo		Vegetación	
	OA	Índice Kappa	OA	Índice Kappa	OA	Índice Kappa	OA	Índice Kappa
As	46,5%	-0,1	60,5%	-0,25	50,4%*	-0,30	52,6%	-0,22
As (-1)	86,9%*	0,46	79,0%*	0,00	45,6%	-0,21	69,2%*	0,03
Cd	37,4%*	0,06	63,2%*	0,14	38,8%*	0,08	35,9%	-0,30
Cd (-1)	22,2%	-0,46	28,9%	-0,5	31,2%	-0,18	53,9%*	0,05
Cr	64,6%	-0,20	57,9%*	0,14	23,2%	-0,12	70,5%*	0,17
Cr (-1)	81,8%*	0,59	34,2%	-0,32	47,2%*	0,10	62,8%	-0,18
Cu	65,7%*	0,25	---	---	51,0%*	0,12	70,5%*	0,37
Cu (-1)	69,7%	-0,16	---	---	44,4%	-0,03	52,6%	-0,04
Hg	65,7%	0,09	---	---	54,4%	-0,09	48,7%	-0,11
Hg (-1)	73,7%*	0,08	---	---	68,0%*	0,22	66,7%*	0,34
Ni	81,8%*	-0,10	68,4%*	0,31	47,6%	-0,01	64,1%*	-0,19
Ni (-1)	57,6%	-0,18	42,1%	-0,30	48,8%*	0,01	44,9%	-0,25
Pb	74,8%*	0,16	63,2%*	0,14	34,4%	0,03	18,0%	0,02
Pb (-1)	58,6%	-0,25	42,1	-0,30	37,2%*	0,04	61,5%*	0,18
Zn	72,7%*	-0,15	65,8%*	0,21	51,2%	-0,05	30,8%	-0,39
Zn (-1)	71,7%	-0,15	42,1%	-0,30	62,4%*	-0,05	83,3%*	0,47

*Mejores resultados obtenidos por localidad y metal pesado; --- No se cuenta con analíticas; (-1) Factor multiplicativo aplicado a la CP seleccionada

Tabla 5.3: Validación de la técnica Crósta con imagen PRISMA.

Metal	RG			
	Suelo		Vegetación	
	OA	Índice Kappa	OA	Índice Kappa
As	57,9%*	0,24	40,3%*	0,01
As (-1)	30,3%	-0,26	40,3%	0,01
Cd	29,8%	-0,21	29,5%	-0,15

Metal	RG			
	Suelo		Vegetación	
	OA	Índice Kappa	OA	Índice Kappa
Cd (-1)	31,5%*	0,08	50,2%*	0,19
Cr	18,7%	-0,22	---	---
Cr (-1)	47,5%*	0,18	---	---
Cu	49,0%*	0,12	45,7%*	0,12
Cu (-1)	39,4%	-0,06	21,7%	-0,27
Hg	50,5%*	0,05	35,9%	-0,05
Hg (-1)	26,6%	-0,41	48,1%*	0,17
Ni	25,3%	-0,36	36,3%	-0,02
Ni (-1)	54,6%*	0,15	54,6%*	0,14
Pb	42,9%	0,09	49,8%*	0,16
Pb (-1)	43,3%*	0,11	19,0%	0,05
Zn	56,9%*	0,13	49,5%*	0,11
Zn (-1)	39,1%	-0,21	41,0%	-0,10

*Mejores resultados obtenidos por localidad y metal pesado; --- No se cuenta con analíticas; (-1) Factor multiplicativo aplicado a la CP seleccionada

Tabla 5.4: Validación de los NDSI en RG.

Metal	Suelo		Vegetación	
	OA	Índice Kappa	OA	Índice Kappa
As	54,0%	0,03	66,7%	-0,15
Cd	12,0%	0,01	56,4%	0,10
Cr	16,0%	-0,02	83,3%	0,14
Cu	45,2%	-0,19	85,9%	0,71
Hg	56,4%	-0,10	52,6%	-0,02
Ni	51,2%	0,07	50,0%	-0,28
Pb	56,0%	0,04	20,5%	0,02
Zn	55,6%	-0,11	43,6%	-0,35

5.3. Discusión

Los resultados obtenidos a partir de la aproximación inicial de los minerales característicos en el PRS: montmorillonita, sepiolita, calcita y yeso, fueron contrastados visualmente con la geoinformación del IGME, obteniendo altas similitudes. En función de esto, se consiguió el adiestramiento necesario para la identificación de elementos traza, y, por otro lado, se corroboró la utilidad de la técnica Crósta, al igual que los estudios realizados por: Bragado et al. (2009); Loughlin (1991); Rejas et al. (2014).

A continuación, se realiza un análisis del proceso de caracterización realizado y de los resultados obtenidos a partir de las técnicas espectrométricas empleadas en la presente investigación:

5.3.1. As

En cuanto a la caracterización realizada de los metales pesados, para el caso del As en suelo, las longitudes de onda 463, 1.365 y 2.217 nm seleccionadas en la presente investigación, tienen una alta concordancia a lo propuesto por Ren et al. (2009), dejando de lado la longitud ubicada en los 1.900 nm, debido a que, dicha región presenta una característica de absorción común, dentro de las firmas espectrales capturadas, ocasionada por el elemento H_2O (Clark, 1999). Por otro lado, las longitudes de onda 484 y 530 nm, para el caso de As en vegetación, presentan altas similitudes a lo propuesto por Ren et al. (2010), dejando de lado las regiones espectrales ubicadas en los 660 y 1.100 nm, pese a que el análisis fue llevado de manera análoga sobre cultivos de arroz, pudiendo deberse esto a la concentración del elemento pesado, a la estructura celular o a la pigmentación de la hoja.

En cuanto la técnica Crósta empleada con imagen Sentinel-2, es recomendable emplear la imagen negativa de la CP4, tanto en suelo como en vegetación, diferenciándose en las bandas de mayor contraste espectral, siendo las bandas B2 y B3 para el caso del suelo, y las bandas B6 y B8 para la vegetación. En el PRS se obtuvieron buenos rendimientos, obteniendo precisiones por encima del 75%, y para el caso del RG se evidencia un rendimiento bajo para el caso de suelo, y un rendimiento aceptable para la vegetación, debiéndose esta diferencia al número de estaciones muestrales existentes para la ejecución de la validación.

Las estadísticas fueron cotejadas con los estudios realizados por Liu et al. (2018); Ren et al. (2010), a pesar de emplear métricas estadísticas distintas, y ante el escaso material bibliográfico, se procedió a realizar dicha comparativa de manera categórica, evidenciando en dichos estudios un R^2 bajo de 0,45 y 0,52, respectivamente, por ende, se denota una mejora significativa en los resultados obtenidos en la presente investigación.

De manera similar se seleccionó la CP4 al emplear datos PRISMA en el RG, con la diferencia de la no aplicación del factor negativo, evidenciando resultados aceptables y bajos, para el caso de suelo y vegetación respectivamente, debiéndose esto al escaso número de muestras que caen sobre la superficie que cubre la imagen. Sin embargo, se obtuvo una mejora respecto a las imágenes Sentinel-2, al momento de identificar el elemento traza en suelo.

Analizando los NDSI aplicados sobre datos Sentinel-2, se obtuvieron precisiones aceptables, por encima del 50% para suelo y vegetación, evidenciando resultados similares a los manifestados por Saha et al. (2022).

5.3.2. Cd

Los autores Feng et al. (2019); Wang et al. (2018), de manera muy general, consideran que las regiones espectrales ubicadas entre el visible e infrarrojo cercano, permiten la identificación del elemento traza en vegetación y suelo, respectivamente, dejando de lado longitudes de onda ubicadas en el infrarrojo de onda corta.

Analizando los resultados derivados de la técnica Crósta empleando datos Sentinel-2, se evidencia que la CP3 podría contener información relacionada a Cd, siendo las bandas B3 y B12 las de mayor contraste para suelo, y las bandas B2 y B5 para vegetación. Los resultados obtenidos de vegetación en ambas áreas test presentan estadísticos con rendimiento aceptable, por otro lado, el suelo presenta un rendimiento pobre. El estudio realizado por Wang et al. (2010) demuestra un R2 aceptable de 0,63 similar al obtenido en el presente estudio al momento de trabajar en vegetación.

Situación símil ocurre al momento de emplear la imagen PRISMA obteniendo mejores resultados en vegetación, por otro lado, los rendimientos son más bajos en comparación a los resultados derivados de los datos Sentinel-2. Cabe indicar que, la imagen negativa de la CP4 fue seleccionada para el respectivo proceso.

En cuanto a los NDSI se evidencia que la precisión para el caso de la vegetación es aceptable (56,4%), y pobre para el caso de suelo (12,0%). Agyeman et al. (2022), combinan distintos índices espectrales y modelos para la detección de Cd en suelos agrícolas, alcanzando un R^2 bueno de 0,83, sin embargo, este tipo de operadores suelen ser más precisos debido a que se ajustan bien a un determinado momento y espacio, sin embargo, son poco eficientes para extrapolaciones.

5.3.3. Cr

A partir de la selección de bandas espectrales para detección en suelo, en comparación a lo propuesto por Song et al. (2015), se evidencia una alta similitud en el espectro visible, sin embargo, existen amplias diferencias en el resto de longitudes de onda seleccionadas, pudiendo deberse a que la selección realizada por el mencionado autor se sustenta en la correlación existente entre las firmas espectrales versus los análisis químicos, y, dentro de la presente investigación se emplea adicionalmente técnicas de transformación y clasificación para la selección de longitudes de onda.

En función de los resultados obtenidos a partir de datos Sentinel-2 mediante la técnica de Crósta se puede evidenciar que dentro de la CP4 se podría detectar el elemento traza en vegetación, y en la imagen negativa de la CP4 para suelo. Las bandas espectrales de mayor contraste espectral son B2 y B3 para el caso de suelo, y, B2 y B4 para la vegetación. Las mejores precisiones fueron las obtenidas en vegetación dentro del área test RG (70,5%) y en suelo en el PRS (81,8%), sin embargo, es necesario considerar que el número de estaciones muestrales difiere uno del otro.

Liu et al. (2018); Wang et al. (2010) presentan en sus estudios realizados un R^2 aceptable y bajo, de 0,52 y 0,49, respectivamente, siendo similar a lo obtenido al momento de detectar el elemento traza en suelo sobre el área test RG. El resto de valores obtenidos en el presente estudio superan las cifras presentadas anteriormente.

En cuanto a las imágenes PRISMA se seleccionó de igual forma la imagen negativa de la CP4, obteniendo una precisión de 47,5% para el caso de suelo, y un índice Kappa de concordancia aceptable, de manera similar a lo obtenido con imágenes Sentinel-2. En cuanto al análisis de vegetación, no se obtuvieron muestras de validación para la derivación de los estadísticos.

Mediante los NDSI se alcanzó una precisión pobre de 16,0% para el caso de suelo, y una buena precisión, de 83,3% para la vegetación, siendo altamente identificable el presente metal pesado mediante la combinación de bandas 2 y 4 de Sentinel-2.

5.3.4. Cu

El proceso de caracterización del presente metal en suelo, obtuvo como resultado longitudes de onda en el espectro visible e infrarrojo medio con una proximidad alta a lo propuesto por Zhang et al. (2010), a excepción de las longitudes de onda 1.512, 1.886 y 2.094 nm, debido a que dichas longitudes presentan características de absorción comunes, originadas por OH y H_2O (Clark, 1999). Caso contrario sucede con la vegetación, debido a que lo propuesto por Ren et al. (2010) no coincide con lo obtenido en el presente estudio, pudiendo deberse a los diferentes tipos de vegetación empleadas.

Los resultados obtenidos a partir de la técnica Crósta en imagen Sentinel-2, se evidencia valores de precisión aceptable en el caso de suelo en ambas áreas test (> 50%), y para la vegetación una buena precisión (70,5%) en el área test RG. Cabe mencionar que, no existen muestras de validación para vegetación en PRS. La particularidad para la detección del presente elemento traza es que la CP y sus bandas con mayor contraste, varían en cada análisis realizado, sin embargo, los mejores resultados se derivan a partir de la CP sin aplicar ningún tipo de factor.

Estudios realizados por Ren et al. (2010); Wang et al. (2010) para la detección de Cu, han alcanzado valores de R^2 buenos de 0,76 y 0,69, respectivamente, aproximándose los resultados obtenidos en la presente investigación a lo planteado por los autores anteriormente mencionados.

De manera idéntica sucede al emplear la imagen PRISMA en el RG, la CP es variante y sin ningún factor multiplicativo aplicado. Las precisiones obtenidas son aceptables, entorno al 50%, para ambas superficies analizadas, presentando valores inferiores a los obtenidos con imágenes Sentinel-2, debiéndose principalmente al escaso número de estaciones muestrales existentes.

A partir del empleo de los índices espectrales se obtuvo una de las mejores precisiones de toda la investigación, alcanzando un 85,9% para la detección de Cu en vegetación, por otro lado, en suelo, se obtuvo una precisión aceptable de 45,2%. Das et al. (2020) presentan un R^2 aceptable de 0,56, evidenciando una leve mejora en comparación del estudio en suelo, y encontrándose muy por debajo del resultado obtenido en vegetación.

5.3.5. Hg

Las bandas espectrales mencionadas por Wang et al. (2018) para la detección de Hg, no guardan relación alguna con el proceso de caracterización efectuado en el presente estudio, y en el caso de la vegetación se aproxima la banda espectral localizada en los 533 nm en comparación al estudio realizado por Dunagan et al. (2007), el resto de bandas del espectro visible: 430, 448 y 471 nm, no han sido consideras en la presente investigación, pudiendo deberse a que el estudio fue realizado en cultivos diferentes (nabo versus olivares), además, dichas longitudes de onda presentan características de absorción común relacionadas con el Fe.

De manera general, empleando imágenes Sentinel-2 se obtuvo los mejores resultados a través de la imagen negativa de la CP4, obteniendo precisiones de rendimiento aceptable, superiores al 65%, para el área test RG, en las superficies de suelo y vegetación, y un rendimiento bueno, superior al 70%, en el PRS, en la superficie de suelo. Las bandas de mayor contraste espectral son las B1, B2 y B3, las dos primeras para la superficie de suelo, y las dos últimas para la vegetación.

El estudio realizado por Liu et al. (2018), presenta un valor de R^2 excelente, sin embargo, el método empleado es PLSR, y como se mencionó anteriormente, dicha técnica es poco eficiente a la hora de extrapolar a nuevas zonas de estudio.

Las precisiones obtenidas con la imagen PRISMA fueron aceptables (≈ 50%), muy por debajo de los estadísticos obtenidos empleando datos Sentinel-2, debiéndose principalmente a la falta de estaciones de validación dentro del área que cubre la imagen.

Los productos obtenidos a partir de los NDSI alcanzaron estadísticos similares a los mencionados en el párrafo anterior, siendo mayor en 3,8 puntos la precisión al momento de analizar la detección del presente metal en suelo.

5.3.6. Ni

En cuanto a la caracterización realizada del Ni, presenta una alta similitud a las bandas seleccionadas dentro del estudio realizado por Lu et al. (2020), a excepción de las longitudes de onda localizadas en 1.180 y 1.520 nm, las cuales presentan características de absorción común generadas por los elementos Fe y OH, respectivamente (Clark, 1999).

A partir de la técnica de Crósta empleada con datos Sentinel-2, evidencia el uso de la CP4 sin aplicar factor multiplicativo alguno, y las bandas de mayor contraste

espectral para el caso de suelo son la B1 y B4, y de la vegetación, la B4 y B5. Las precisiones derivadas en el PRS superan el 80% para el suelo, siendo similar al buen R^2 alcanzado por Liu et al. (2018), con metodología PLSR. En cambio, para el caso de vegetación en ambas áreas test presentan valores de precisión aceptables, sobrepasando el 60%.

A partir de los datos PRISMA se empleó la imagen negativa de la CP4, obteniendo precisiones aceptables y similares tanto en suelo como en vegetación (≈ 55%). Dichas precisiones se encuentran por debajo de los valores obtenidos con Sentinel-2, a excepción del suelo en el RG. Por otro lado, se alcanzaron valores de precisión próximos al 50%, tanto en suelo como en vegetación empleando índices espectrales, como lo indica

En función de los resultados y estadísticos derivados de los índices espectrales, se denota que la precisión para el caso del suelo posee valores aceptables (56,0%) y la vegetación presenta valores pobres (20,5%), lo cual podría ser solucionado mediante el uso de dos bandas espectrales distintas que intervienen en el ACP.

5.3.7. Pb

Las longitudes de onda 1.930 y 2.148 nm propuestas por Zhang et al. (2010), sensibles al contenido de Pb en suelo, poseen una alta similitud con las bandas seleccionadas en el presente estudio, sin embargo, existen un mayor número de bandas en el espectro visible e infrarrojo cercano. Por otro lado, las bandas propuestas por Ren et al. (2010) para el caso de la vegetación presenta una ligrera concordancia en el visible, dejando de lado la longitud de onda 1.100 nm, pudiendo deberse a la estructura celular de la misma y al tipo de vegetación empleado para los estudios (arroz vs girasol).

Al momento de aplicar la técnica Crósta en datos Sentinel-2 se puede evidenciar que, de manera general se emplea la CP4, siendo las bandas 4-5, y 11-12, aquellas de mayor contraste espectral para el caso de suelo y vegetación, respectivamente. Para el caso del PRS se empleó la CP sin ningún tipo de factor multiplicativo, caso contrario sucedió en el RG, donde fue necesario la aplicabilidad del factor negativo. Las mejores precisiones fueron alcanzadas en el suelo del PRS con un 74,8% y en la vegetación de ambas áreas test con valores de precisión aceptables > 60%, siendo similar al R^2 aceptable obtenido por Ren et al. (2010).

Los estadísticos obtenidos con la imagen PRISMA, se evidencia una mejora con respecto a la detección en suelo del área test RG, obteniendo valores aceptables

para las dos superficies analizadas. Por otro lado, el empleo de NDSI presenta una mejora en las precisiones del suelo (56,0%)

De manera similar se seleccionó la CP4 al emplear datos PRISMA en el RG, con la diferencia de la no aplicación del factor negativo, evidenciando resultados aceptables y bajos, para el caso de suelo y vegetación respectivamente, debiéndose esto al escaso número de muestras que caen sobre la superficie que cubre la imagen. Sin embargo, se obtuvo una mejora respecto a las imágenes Sentinel-2, al momento de identificar el elemento traza en suelo.

5.3.8. Zn

En función de las bandas sensibles seleccionadas por Sun et al. (2017), para suelo, se evidencia una alta concordancia con las bandas espectrales obtenidas en el presente estudio, a pesar de que los tipos de suelos en los que fueron realizados los estudios difieran (arcilloso vs franco arenoso).

A partir de la técnica Crósta con imágenes Sentinel-2 se puede señalar de manera general que, la CP4 fue seleccionada para la localización del elemento traza, siendo las bandas 3-5 y 11-12, de mayor contraste espectral en suelo y vegetación, respectivamente. Las precisiones obtenidas son buenas, superando el 60% en las dos áreas test trabajadas, la única diferencia es que en el RG se empleó sobre la CP seleccionada el factor multiplicativo de (-1). En función de esto, se evidencia mejores resultados a los obtenidos por Kooistra et al. (2003); Ren et al. (2010), los cuales alcanzaron un R^2 de 0,64 y 0,34, respectivamente.

Por otro lado, en el área test RG, las precisiones derivadas al emplear la imagen PRISMA y al ocupar la técnica de índices espectrales, oscilan entre el 50% y 55%, siendo similar al R^2 obtenido en el estudio realizado por Das et al. (2020) en donde se emplea índices de diferencia normalizada.

En resumen, en el PRS se evidencia buenas precisiones (> 80%) al detectar As, Cr y Ni en suelo, y As en vegetación, por otro lado, en el RG las mejores precisiones fueron obtenidas a partir del Hg y Zn en suelo, y As, Cr, Cu y Zn en vegetación. De igual forma las precisiones más bajas fueron derivadas del Cd en suelo, pudiendo deberse a la complejidad que presente dicho metal para ser aislado a partir de las muestras tomadas. Se hace hincapié en que no existe una firma espectral dentro de las librerías que contemplen a un mineral con alta presencia de Cd.

En la zona de estudio RG se tiene un mayor número de estaciones muestrales en comparación a PRS, lo que conlleva a que en esta zona existe un número mayor de ROIs, permitiendo alcanzar una mayor fiabilidad al momento de derivar los estadísticos. Los valores más altos de OA e índice Kappa son presentados por la vegetación en comparación al suelo.

En cuanto al trabajo realizado con la imagen PRISMA en el área test RG, permitió una selección más sencilla de bandas espectrales en comparación a la realizada con Sentinel-2, además, se evidencia de manera general que los resultados obtenidos presentan un menor OA, variando entre 45 y 55%, sin embargo, el valor del índice Kappa presenta una mejor concordancia que la esperada por azar, en comparación a los resultados obtenidos con la imagen Sentinel-2. Es de importancia mencionar que, la imagen PRISMA cubre una superficie aproximada de 680 km^2 dentro del área de estudio, por ende, el número de muestras se reduce considerablemente.

Por otro lado, los índices de diferencia normalizada aplicado en la imagen Sentinel-2 de la zona RG, presentan rendimientos aceptables para el caso de suelo, a excepción de los metales Cd y Cr (< 20%), y para el caso de la vegetación, los rendimientos de los metales Cr y Cu son buenos (> 80%). Cabe mencionar que, esta técnica presenta una ventaja en comparación a la técnica Crósta debido a su amigabilidad al momento de aplicar el algoritmo.

En función de lo mencionado, estas técnicas son una alternativa para poder identificar previamente la posible existencia de metales pesados, sin embargo, la dependencia de las muestras de validación limita su precisión, siendo necesario contar con datos más representativos para verificar los algoritmos empleados.

6. TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA A ECUADOR

"Los ecuatorianos son seres raros y únicos:
duermen tranquilos en medio de crujientes volcanes,
viven pobres en medio de incomparables riquezas
y se alegran con música triste"
(Alexander Von Humboldt)

CONTENIDO:

6.1.	Zona de estudio	174
6.2.	Obtención y tratamiento de geoinformación	177
6.3.	Estaciones muestrales	178
6.4.	Empleo de técnicas espectrométricas para detección de metales pesados	184
6.5.	Validación de resultados	186
6.6.	Discusión de resultados obtenidos en la transferencia	187

6.1. Zona de estudio

La definición de la zona de estudio para la transferencia de tecnología tuvo como consideración especial las plantaciones de cacao, debido a su gran importancia económica y su destacado impacto en el desarrollo local. Analizando las exportaciones a nivel mundial (Figura 6.1) para el año 2019, Ecuador se ubica en el puesto número 5, con una representación del 7,1%, antecedido por los países: Costa de Marfil, Ghana, Camerún y Países Bajos (ITC, 2020). Sin embargo, de manera puntual, la exportación del cacao fino de aroma, ha posicionado al país como el principal exportador de este producto en el mundo (MAG, 2019).

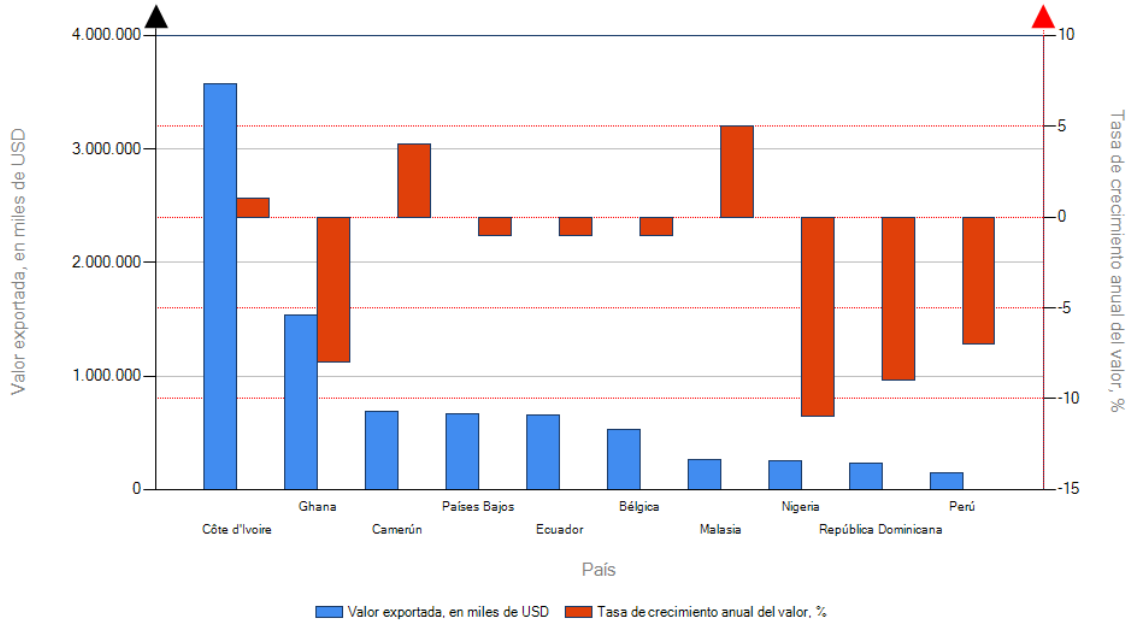


Figura 6.1: Lista de países exportadores 2019. Producto 1801: Cacao en grano, entero o partido, crudo o tostado.

Fuente: ITC (2020).

Ecuador exportó, en el año 2019, aproximadamente 271.000 toneladas de cacao, principalmente a: Indonesia (25,7%), Estados Unidos de América (17,4%) y Países Bajos (15,7%), representando el 5.9% del Valor Agregado Bruto Agropecuario del Ecuador en el año 2019, ubicándose por detrás del banano y las rosas. Por otro lado, analizando la importancia de este producto en países europeos, el mismo representa para Países Bajos el 0,4% del valor total importado, ubicándolo entre los 30 productos principales de importación, y para España, representa el 0,1% del

valor total importado, situándolo entre los primeros 300 productos (ITC, 2020; Lema, 2020; MAG, 2020).

Las variables que han contribuido a mejorar el rendimiento del cacao son: edad del cultivo, variedad, densidad, número de frutos por planta, aplicación de fertilizante, utilizar material de siembra certificado y capacitaciones (Lema, 2020). En la Figura 6.2 se puede evidenciar el ciclo del cultivo de cacao desde antes de la siembra, hasta su poscosecha (INIAP & MAG, 2017).

Figura 6.2: Ciclo del cultivo del cacao.
Fuente: Tomado de INIAP & MAG (2017).

Existen algunas zonas cacaoteras dentro de Ecuador, debido a que, este fruto se da hasta los 800 msnm en zonas tropicales, sin embargo, para la selección de la zona de estudio se evaluó la accesibilidad, proximidad respecto a la residencia, seguridad, y la existencia de la problemática en función del asesoramiento del personal del MAG.

6.1.1. Ubicación geográfica

En función de las consideraciones propuestas, el área de estudio definida se localiza entre las provincias de Orellana y Sucumbíos, extendiéndose desde la ciudad de Puerto Francisco de Orellana, al suroeste, hasta Shushufindi, al noreste, teniendo como ciudad central a Joya de los Sachas, con una superficie de 2.262,48 km^2 (Figura 6.3), en donde se han evidenciado problemas de contaminación ambiental, específicamente relacionados con la actividad petrolera (González, 2023; MAG - CGSIN, 2021; San Sebastián et al., 2004).

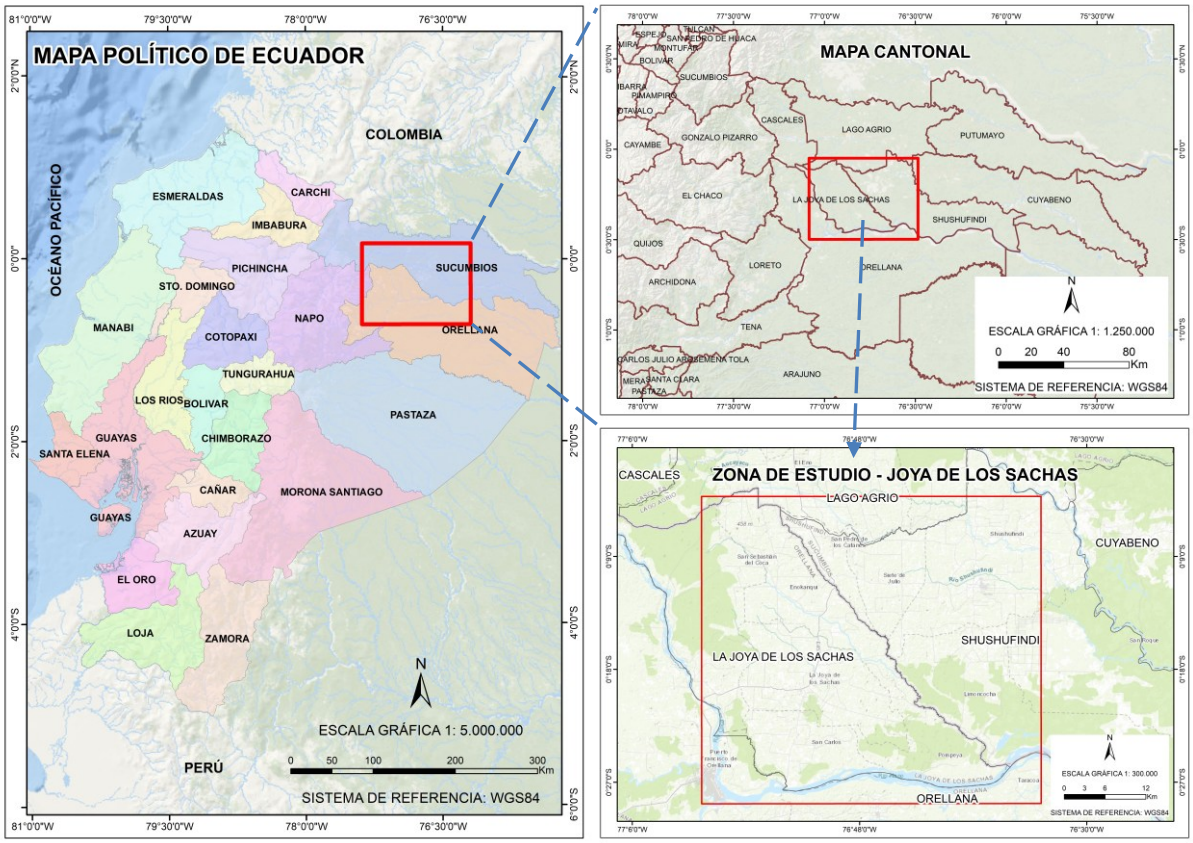


Figura 6.3: Ubicación del PRS.
Fuente cartográfica: ESRI (2020); IGM (2024).

6.1.2. Descripción físico ambiental

La zona de estudio presenta tres unidades ambientales, la primera ubicada al norte, denominada como colinas periandinas, caracterizadas por presentar relieves bajos de la Formación Curaray, de composición litológica arcillas estratificadas en alternancia con areniscas, y en cuanto a la cobertura vegetal, predomina el bosque húmedo y pasto cultivado.

La segunda unidad ambiental, abarca aproximadamente el 70% de la zona de estudio, denominada como piedemonte andino, con variada cobertura de ceniza volcánica, compuesta por areniscas de grano medio y grueso, y presencia de limos y guijarros, asociada a una cobertura boscosa, matorrales, cultivos de cacao, plátano, palmito y caña.

Por último, se encuentra la unidad ambiental denominada como medio aluvial, asociada a los ríos Coca y Napo, ubicados al sur y oeste de la zona delimitada, de

caudales ≈ 3.300 y 6.900 m^3/s, respectivamente. Se encuentra caracterizada por la presencia de terrazas con diferentes niveles, compuesta por arenas, limos, arcillas y cantos rodados, coligados a una cobertura de tipo bosque húmedo alterado y plantaciones de café y plátano (Winckell et al., 1997).

6.2. Obtención y tratamiento de geoinformación

Al igual que en las áreas test de España, se empleó geoinformación de acceso libre, a partir de entidades oficiales, la cual fue estandarizada bajo un mismo sistema de referencia, utilizando WGS84 UTM Z18S para la zona de estudio de Ecuador (EC). La geoinformación con la que se trabajó se menciona en la Tabla 6.1 y

Tabla 6.2.

Tabla 6.1: Cartografía base y temática EC.

Organismo	Cobertura	Descripción
IGM	Límites administrativos y cartografía base	Año: 2011 Formato: *.shp Escala: 50k
	Uso y cobertura del suelo	Año: 2015 Formato: *.shp Escala: 25k
	Geopedología	Año: 2015 Formato: *.shp Escala: 25k
	Redes de estaciones permanentes GNSS	Año: 2024 Formato: *.rnx
	Sistema de coordenadas original: EPSG:32717- WGS84 UTM Z17S Fuente: IGM (2024)	
IIGE	Mapa geológico del Ecuador	Años: 2017 Formato: *.pdf Escala: 100k
	Sistema de coordenadas original: EPSG:32717- WGS84 UTM Z17S Fuente: IIGE (2017)	

Tabla 6.2: Imágenes satelitales EC.

Organismo	Cobertura	Descripción
ESA	Imágenes Sentinel-2	Fechas: 27/06/2022 (S2A) y 10/10/2022 (S2B)
	Formato: *.jp2 Nivel de procesamiento: L2A (ρ BOA) Sistema de coordenadas: EPSG:32718-WGS84 UTM Z18S Fuente: ESA (2024a)	

Para la transferencia de tecnología se manejaron imágenes Sentinel-2 de diferentes fechas, debido a que, la imagen más antigua fue utilizada en la aproximación inicial de elementos traza, y la imagen más reciente se empleó en el proceso de localización geoespacial de metales. Se solicitó una imagen WorldView-3 del año 2020, la cual fue autorizada, sin embargo, hasta la fecha de la entrega de la presente investigación, no se tuvo acceso a la imagen.

6.3. Estaciones muestrales

Para definir las estaciones muestrales preliminares, se trabajó con la técnica de Crósta e interpretación visual, definiendo de esta forma los puntos donde se tomarán muestras de suelo y vegetación, y de igual forma, en función de los mismo, se planificó una ruta óptima para la ejecución de la campaña de campo.

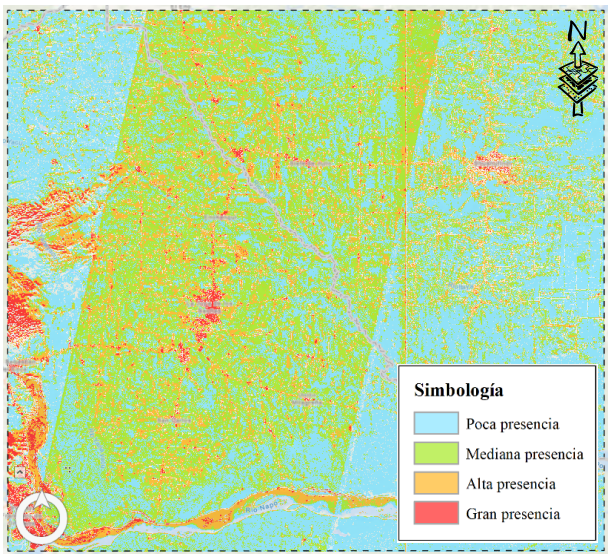
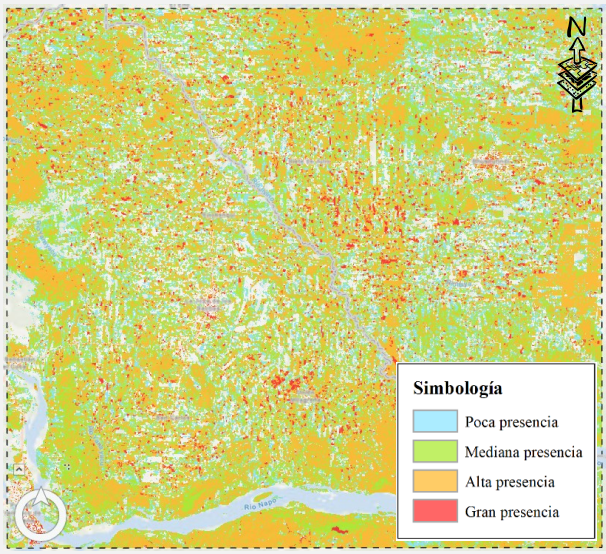
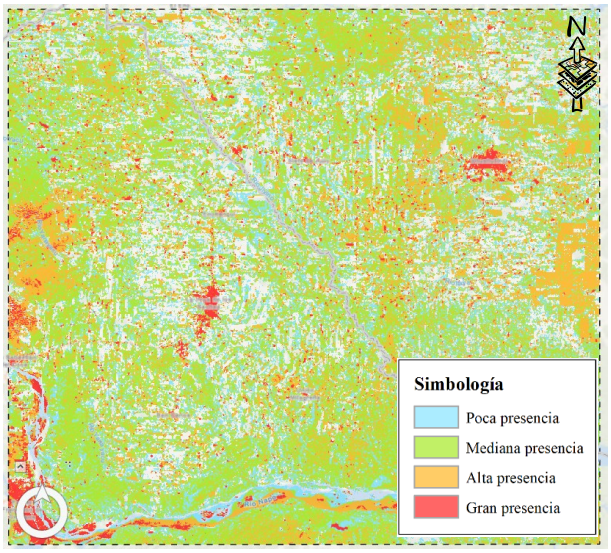
6.3.1. Mapeo preliminar espectrométrico

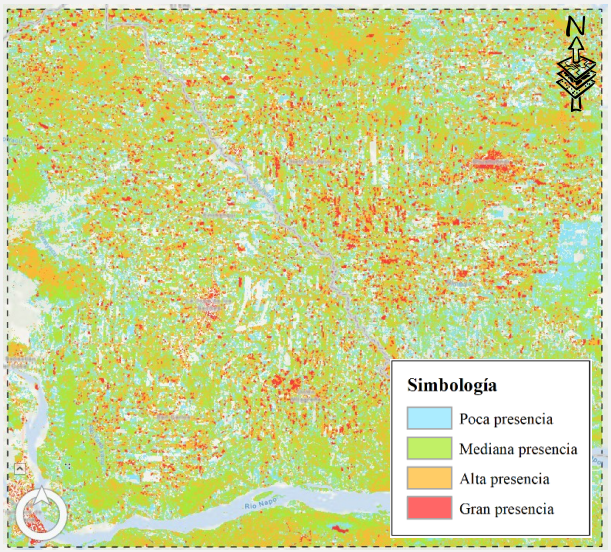
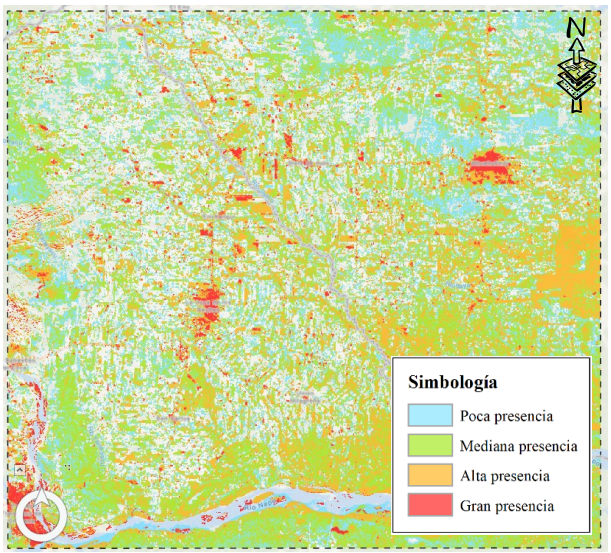
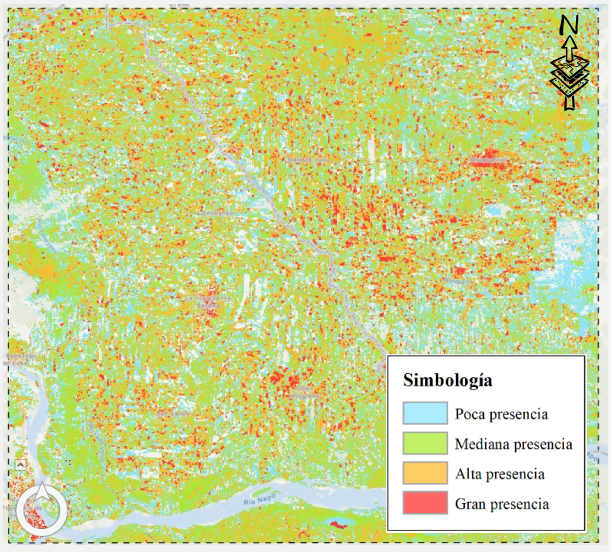
Con las bandas detalladas en la Tabla 4.7, se utilizó la técnica de Crósta en la zona de estudio EC sobre la imagen Sentinel-2, a la cual previamente se le aplicó el factor multiplicativo (0,0001) para obtener valores de reflectividad que fluctúan entre 0 y 1, adicionalmente, la imagen fue recortada en función de la zona de estudio indicada en la Figura 6.3.

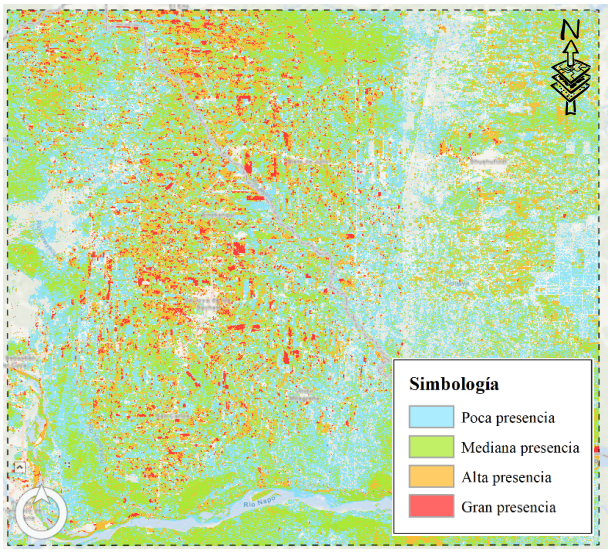
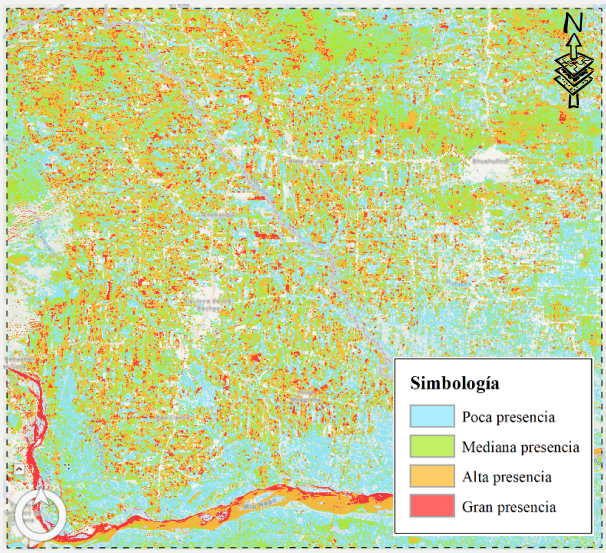
En la Tabla 6.3 se presenta un resumen de las CP seleccionadas en función del análisis de los autovectores obtenidos a partir de la técnica Crósta, para cada uno de los metales pesados, y de igual forma, se agregan los resultados alcanzados a partir de la CP seleccionada y clasificada mediante técnica *k-means*.

En las gráficas se pueden visualizar las localizaciones preliminares de los diferentes metales pesados a lo largo de la zona de estudio EC. Se encuentra claramente delimitada el área, y la leyenda empleada fue: poca, mediana, alta y gran presencia del elemento traza.

Tabla 6.3: CP seleccionadas a partir de la técnica de Crósta en EC.

Metal (CP seleccionada)	Gráfica
As (CP4)	
Cd (CP3*)	
Cr (CP3)	

Cu (CP3)	
Hg (CP4)	
Ni (CP3)	

Pb (CP4)	
Zn (CP4*)	

*CP multiplicada por un factor de -1

6.3.2. Campaña de campo y resultados

Para el proceso de transferencia de tecnología se desarrolló una salida de campo a la zona de estudio, desde el 15/09/2022 al 17/09/2022, pudiendo cumplir con el 90% de las muestras planificadas a partir de la CP seleccionadas, como se puede evidenciar en la Tabla 6.4

Tabla 6.4: Número de muestras planificadas vs ejecutadas EC.

Zona	Tipo de muestra	Planificado	Ejecutado
EC	Suelo	25	21
	Cultivo	15	15
TOTAL		**40**	**36**

En la Figura 6.4 se puede visualizar el recorrido planificado para la recolección de muestras de suelo y vegetación en la zona de estudio.

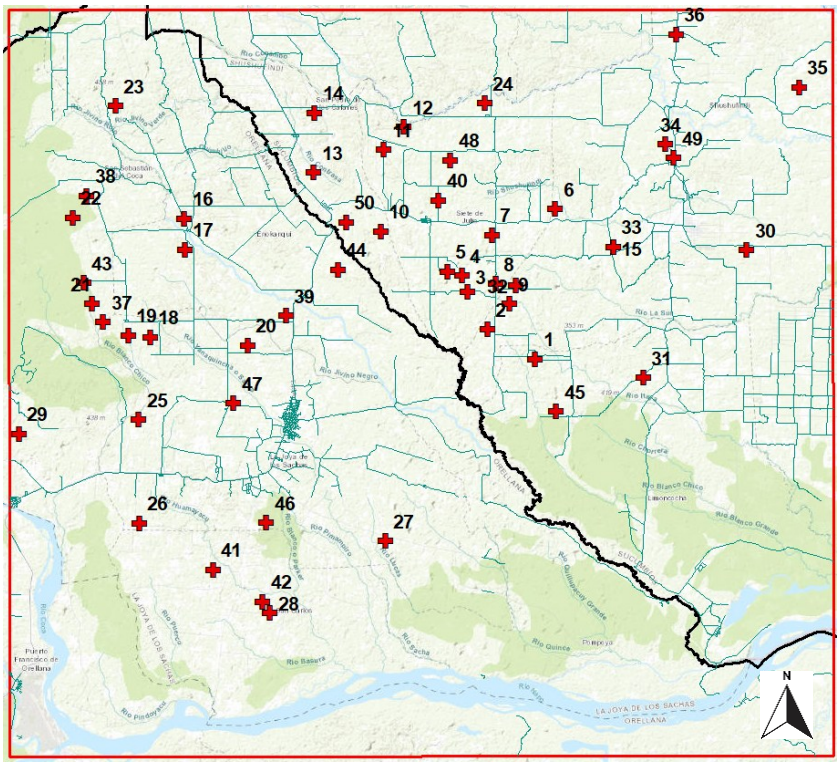


Figura 6.4: Planificación de estaciones muestrales en EC.
Fuente cartográfica: ESRI (2020); Google (2021).

Dentro de la campaña de muestreo realizada en la zona de estudio EC se utilizó un equipo GNSS de una frecuencia, de marca *Mobile Mapper*, el cual recopiló los datos de ubicación de las estaciones muestrales y posteriormente, mediante corrección diferencial haciendo uso de la estación Francisco de Orellana de la Red GNSS de Monitoreo Continuo del Ecuador (REGME), y empleando el *software Trimble Business Center*, se pudo obtener la coordenada de cada estación.

a. Analíticas

Los incrementos muestrales de suelo y las hojas de cultivo fueron recolectados, almacenados, etiquetados, transportados y tratados de manera similar a lo explicado en el capítulo 4, de igual forma, por cada estación muestral se llenó el respectivo estadillo de campo, útil para registrar las características del lugar (Figura 6.5).

Figura 6.5: Levantamiento de muestras en EC.

La ESPE colaboró en el proceso de preparación física y análisis edáfico de las muestras (Figura 6.6), por otro lado, el CIEMAT cooperó en la obtención de la concentración de Hg, y el CEBAS-CSIC en la medición de las concentraciones de los metales pesados restantes.

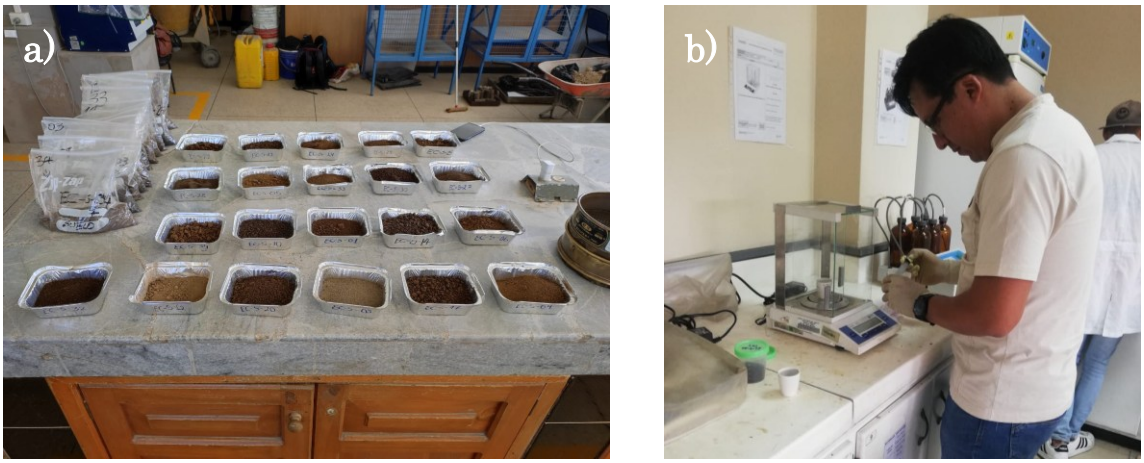


Figura 6.6: Preparación física de muestras EC: a) secado de muestras; b) determinación de materia orgánica.

b. Firmas espectrales

El grupo GEOINCA colaboró de igual forma en la obtención de las firmas espectrales de las muestras de suelo trituradas y vegetación, siendo ejecutada la presente actividad en el mes de octubre de 2022. Para dicho fin se emplearon los mismos materiales y metodología descritas en la fase de experimentación (Figura 6.7).

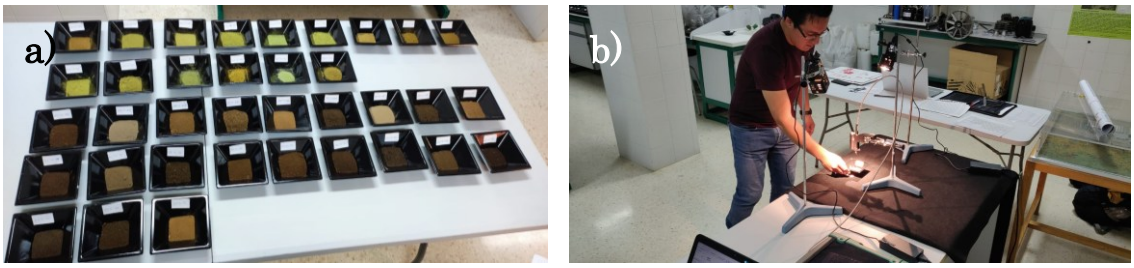


Figura 6.7: Firmas espectrales: a) muestras EC; b) captura.

Cabe indicar que, las fichas de campo levantadas en campo EC, se encuentran plasmadas en el Anexo C del presente documento. Adicionalmente los resultados de las analíticas y los estadillos del trabajo de gabinete para la recolección de firmas espectrales se encuentran en los Anexos D y E, respectivamente.

6.4. Empleo de técnicas espectrométricas para detección de metales pesados

6.4.1. Técnica de Crósta

A partir de la Tabla 4.39 para el caso de Sentinel-2, se tomaron las bandas espectrales con la finalidad de replicar la técnica Crósta dentro de la zona de estudio EC. Dicha imagen Sentinel-2 empleada en la localización de metales pesados, fue resampleada a 10 m y transformada de números digitales (ND) a reflectividades, empleando el factor aditivo y multiplicativo, -1.000 y 10.000, respectivamente, esto debido a que a partir del nivel de procesamiento 4 se incluye el factor aditivo mencionado.

Debido a las nubes que se presentan en la zona de estudio EC se usó la escena clasificada que viene adjunta a las bandas espectrales (*SLC_Classification*), empleando específicamente las clases: nube y sombra de nubes, enmascarando

dichas superficies para no tener inconveniente alguno al momento de aplicar la técnica de Crósta.

A continuación, se presenta las CP seleccionadas en función de las matrices de autovectores para el caso de Sentinel-2, tanto de suelo como de vegetación (Tabla 6.5). Para esto se tomó como sustento la Tabla 4.39, en donde se definen las bandas espectrales empleadas dentro del proceso, y la Tabla 5.2, para la aplicación o no del factor multiplicativo (-1) de manera directa.

Tabla 6.5: CP seleccionadas a partir de Crósta en EC y bandas de alto contrate.

	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Caracterización (suelo) - EC	CP4	CP4	CP4	CP4	CP4	CP4	CP4	CP4
	-B2 +B3	-B6 +B8	-B2 +B3	-B2 +B3	+B1 -B2	+B1 -B4	-B4 +B5	+B3 -B5
Caracterización (vegetación) - EC	CP4	CP4	CP4	CP4	CP4	CP3	CP4	CP4
	+B6 -B8	+B2 -B4	-B2 +B4	-B2 +B5	-B2 +B3	-B5 +B12	-B11 +B12	-B11 +B12

6.4.2. NDSI

A partir de las combinaciones espectrales mencionadas en la Tabla 6.5 se aplicaron las ecuaciones en la imagen Sentinel-2 correspondiente a la zona de estudio EC, posteriormente los resultados fueron validados en función de las analíticas y ROIs de las estaciones muestrales existentes (Tabla 6.6).

Tabla 6.6: Combinaciones de bandas Sentinel-2 empleadas en índices espectrales en EC.

Bandas espectrales para suelo	Bandas espectrales para vegetación
As: B3-B2 / B3+B2	As: B6-B8 / B6+B8
Cd: B8-B6 / B8+B6	Cd: B2-B4 / B2+B4
Cr: B3-B2 / B3+B2	Cr: B4-B2 / B4+B2
Cu: B3-B2 / B3+B2	Cu: B5-B2 / B5+B2
Hg: B1-B2 / B1+B2	Hg: B3-B2 / B3+B2
Ni: B1-B4 / B1+B4	Ni: B12-B5 / B12+B5
Pb: B5-B4/B5+B4	Pb: B12-B11 / B12+B11
Zn: B3-B5 / B3+B5	Zn: B12-B11 / B12+B11

6.5. Validación de resultados

Para la validación de resultados se emplearon ROIs, obtenidas a partir de las analíticas procedentes de las muestras tomadas en campo, siguiendo el proceso: identificación de estaciones con valor superior o inferior al límite permisible > segmentación de imágenes > apoyo de las 3 CP de la escena general.

En función de esto, se emplearon los estadísticos OA e índice Kappa, para evaluar la fiabilidad de las técnicas espectrométricas, como se indica en la Tabla 6.7 y Tabla 6.8.

Tabla 6.7: Validación de la técnica Crósta en EC.

Metal	Suelo		Vegetación	
	OA	Índice Kappa	OA	Índice Kappa
As	48,1%*	-0,02	50,9%*	0,03
As (-1)	10,5%	0,01	39,8%	-0,19
Cd	61,9%*	0,13	26,3%	0,02
Cd (-1)	58,6%	0,13	33,9%*	-0,11
Cr	43,7%	-0,12	55,9%	-0,04
Cr (-1)	52,5%*	0,09	62,7%*	0,09
Cu	37,0%	-0,20	52,5%*	0,09
Cu (-1)	37,0%*	0,04	37,3%	-0,19
Hg	43,7%*	0,05	36,4%	-0,25
Hg (-1)	38,7%	-0,09	53,4%*	0,03
Ni	64,1%*	0,10	61,9%*	0,18
Ni (-1)	49,2%	-0,05	67,0%	0,03
Pb	48,1%	-0,02	31,4%	-0,34
Pb (-1)	53,0%*	0,13	55,1%*	0,10
Zn	37,6%	-0,03	67,8%*	0,36
Zn (-1)	53,0%*	0,06	39,8%	-0,21

*Mejores resultados obtenidos por localidad y metal pesado; --- No se cuenta con analíticas; (-1) Factor multiplicativo aplicado a la CP seleccionada

Tabla 6.8: Validación de los NDSI en EC.

Metal	Suelo		Vegetación	
	OA	Índice Kappa	OA	Índice Kappa
As	71,3%	0,06	49,2%	-0,02
Cd	64,6%	0,14	37,3%	0,10
Cr	43,1%	-0,09	60,2%	0,28
Cu	27,6%	-0,14	62,7%	0,29
Hg	38,1%	0,01	92,9%	0,00
Ni	74,6%	0,27	58,5%	0,18
Pb	42,5%	0,03	42,4%	-0,12
Zn	42,5%	-0,02	46,6%	-0,04

6.6. Discusión de resultados obtenidos en la transferencia

Los resultados obtenidos en la transferencia realizada de España a Ecuador, fueron contrastados con los resultados derivados de las áreas test PRS y RG, con la finalidad de verificar si las técnicas espectrométricas empleadas en suelos y vegetación son una alternativa para la localización de elementos traza en diferentes localidades.

En cuanto al elemento traza As, se evidencia que la CP4 podría contener información sobre el elemento traza, de manera similar a lo trabajado en las áreas test, de igual formas, las diferencias obtenidas en las precisiones son mínimas, presentando valores ≈ 50%, siendo levemente mejor el caso de estudio en vegetación a comparación del suelo. Cabe mencionar que, la única diferencia existente radica en la no negatividad de la CP seleccionada.

Al momento de emplear el NDSI, se logra una mejora significativa en la precisión al detectar el metal pesado en suelo, alcanzado valores superiores al 70%, presentando una mejora a los resultados obtenidos por Saha et al. (2022). Por otro lado, existe una disminución de 17 puntos porcentuales al momento de trabajar sobre vegetación.

Otro de los metales pesados estudiados fue el Cd, en donde se selecciona la CP4 debido al análisis de la matriz de autovectores, siendo esta una de las diferencias a la CP3 seleccionada en las áreas test, adicionalmente, las bandas de mayor contraste espectral en suelo presentan una diferente combinación, siendo

seleccionada para la zona de estudio EC las bandas 6-8. Otra de las diferencias radica en la mejora significativa en las precisiones derivadas del suelo, superando el 60%, siendo similar a lo obtenido por Wang et al. (2010). Por otro lado, de igual forma al caso anterior, existe una reducción en la precisión al tratarse de la vegetación.

En cuanto a los NDSI, existe una mejora notable en cuando al trabajo realizado en suelo en comparación a lo obtenido en las áreas test, estando muy próximo al R^2 bueno obtenido por Agyeman et al. (2022). Cabe recordar que, la métrica estadística empleada por el autor difiere a la utilizada en el presente estudio, sin embargo, debido al escaso material bibliográfico, fue utilizada para contrastar de manera categórica los resultados.

A partir del estudio realizado para la detección de Cr, se trabajó con similar CP a la empleada en PRS y RG, con la diferencia que los mejores resultados fueron derivados al aplicar el factor negativo en la CP4, obteniendo una mejora para el caso suelo en comparación al RG y una leve disminución de la precisión en la vegetación, y viceversa sucede comparando con el área test PRS. La precisión en vegetación supera los estadísticos obtenidos en los estudios de Liu et al. (2018); Wang et al. (2010).

Analizando los resultados obtenidos en los índices espectrales, la tendencia se mantiene, mejorando notablemente las precisiones en suelo y disminuyendo de manera leve las precisiones en vegetación, sin embargo, el índice Kappa presenta una mejor concordancia en este último.

Para el caso del Cu, se suprime la variabilidad que se presentaba en las áreas test, seleccionando únicamente la CP4 en función de los autovectores, siendo multiplicada por el factor negativo para suelo únicamente. Los resultados derivados evidencian un leve empeoramiento al trabajar en suelo y vegetación en comparación a lo obtenido en las áreas test, y a los estudios realizados por Ren et al. (2010); Wang et al. (2010). Caso similar sucede al analizar los resultados en los índices espectrales presentan una menor precisión en comparación a las áreas test.

Al momento de trabajar con Hg, se evidencia que la CP4 y las bandas de mayor contraste con similares a las áreas test, sin embargo, la precisión cae muy por debajo en suelo y es similar en vegetación en comparación a los resultados obtenidos en España. Por otro lado, al momento de emplear índices espectrales se evidencia una mejora significativa en la precisión al trabajar con vegetación (> 90%), asemejándose al estadístico obtenido por Liu et al. (2018).

Concentrándonos en la localización del elemento traza Ni, se evidencia que la CP4 fue seleccionada para suelo y la CP3 para vegetación, a diferencia de lo trabajado en España, de igual forma, sus bandas Sentinel-2 de mayor contraste espectral varían en la vegetación de 4-5 a 5-12. En función de esto, las precisiones de suelo quedan por debajo de las alcanzadas en España y las precisiones de vegetación se mantienen. En cuando a los índices espectrales empleados, se obtienen mejores precisiones a las alcanzadas en territorio español, siendo del 74,6% y 58,5% para el caso de suelo y vegetación, respectivamente.

Tratando el tema del Pb, las CP y las bandas de mayor contraste son similares a las empleadas en las áreas test, sin embargo, los resultados obtenidos en suelo y vegetación están por debajo a lo derivado en territorio español, alcanzando precisiones aceptables en la zona de estudio EC (> 50%). Por otro lado, en cuanto se refiere a índices espectrales se evidencia una mejora en la precisión al trabajar en vegetación, y una leve disminución en suelo.

En cuanto se refiere al Zn, se emplearon las mismas CP que en España, sin embargo, para el caso de suelo únicamente, se utilizó la CP aplicando el factor multiplicativo (-1), de igual forma, las precisiones alcanzadas son aceptables, se encuentran levemente por debajo de lo obtenido en España, y sus valores son similares a lo publicado por Kooistra et al. (2003). En cuanto a los NDSI, se presentan precisiones similares al trabajar en vegetación y presiones levemente menores al trabajar con suelo.

De manera general, se alcanzaron resultados aceptables analizando el estadístico OA, con concordancias ligeras y aceptables en cuanto al índice Kappa. Los mejores resultados, empleando la técnica Crósta, fueron obtenidos por parte del Cd y Ni, en suelo, superando el 60% de OA, y en cuanto a la vegetación, los mejores resultados fueron obtenidos al analizar los elementos traza de Cr, Ni y Zn.

Es de importancia mencionar que, la menor precisión presentada en suelo y/o vegetación, en comparación a las áreas test de España, puede deberse a que los píxeles presentan una mayor mezcla, pudiendo ser esto solucionado con imágenes de mayor resolución espacial. Por otro lado, no contar con un estudio de niveles de fondo y referencia de metales pesados en Ecuador, genera una complicación al momento de generar las clases que corresponden a presencia (concentraciones por encima de la normativa) y ausencia del elemento traza (concentraciones por debajo de la normativa), por ende, se empleó los valores utilizados en las áreas test.

En cuanto al método de índices espectrales, se denota una mejora en los metales pesados As, Cd, Cr y Ni, en cuanto al suelo. El resto de elementos traza, obtuvieron rendimientos más bajos en cuanto a los estadísticos analizados, por ende, para la detección de Cu, Hg, Pb y Zn, se podrían emplear los algoritmos utilizados en las áreas test de España.

En cuanto a los índices espectrales en vegetación, los únicos metales pesados que presentaron mejora, en función de los estadísticos empleados, son el Hg, Ni y Pb. Para el resto de metales pesados se podría aplicar de manera similar, los algoritmos utilizados en las áreas test.

En función de lo mencionado, y del trabajo realizado, no se puede automatizar el método Crósta, debido a que requiere el análisis del operario al momento de seleccionar las CP mediante las matrices de autovectores obtenidas, sin embargo, la técnica es ampliamente útil para la detección de elementos traza.

7. CONCLUSIONES

" Es propio de un espíritu fuerte profundizar los asuntos que trata,

y no dejarse sorprender por las apariencias"

(Eugenio Espejo)

CONTENIDO:

7.1.	Conclusiones	192
7.2.	Innovación de la tesis	202
7.3.	Utilidad de la investigación	203
7.4.	Líneas futuras de investigación	204
7.5.	Autoevaluación	205

7.1. Conclusiones

La ejecución del presente apartado aborda de manera sistemática lo planteado dentro del capítulo 1, específicamente lo relacionado a las preguntas de investigación, objetivos generales y específicos, y las hipótesis de la presente investigación.

Preguntas de la investigación:

- ¿Es viable, a partir de datos multifuente, caracterizar espectralmente a los metales pesados en explotaciones agro-forestales?

Sí, la caracterización espectral de los metales pesados en explotaciones agro-forestales utilizando datos multifuente es viable y efectiva. El estudio realizado demuestra que la combinación de datos de imágenes satelitales (como Sentinel-2) y mediciones in situ, son herramientas eficaces para identificar las longitudes de onda sensibles a los distintos elementos traza, y, mapear la presencia de metales pesados en diferentes tipos de suelos y vegetación.

Las técnicas espectrométricas empleadas, así como el uso de los algoritmos de la técnica de Crósta y NDSI, permitieron caracterizar e identificar elementos traza como: As, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Ni y Zn. Aunque se observaron algunas diferencias en la precisión entre los datos de suelo y vegetación, la metodología mostró ser efectiva para caracterizar espectralmente los metales pesados.

En este sentido, el uso de imágenes satelitales y otros datos multifuente permite identificar posibles áreas contaminadas por metales pesados, lo que sería difícil de lograr solo con métodos in situ. Así, se confirma que la caracterización espectral de los metales pesados en explotaciones agro-forestales utilizando datos multifuente es una estrategia viable y útil.

- ¿Las tecnologías procedentes de programas actuales, de libre acceso, por ejemplo, de Copernicus, integrados con tecnologías in situ y/o datos multifuente, permiten el diseño de un sistema de monitorización de presencia de metales pesados?

Sí, las tecnologías de libre acceso, como las proporcionadas por el programa Copernicus, integradas con datos in situ e información multifuente, son esenciales para el diseño de un sistema de monitoreo efectivo de la presencia de metales pesados.

Este proceso se lo puede evidenciar en las áreas test PRS y RG, ubicadas en España, donde las imágenes de Sentinel-2, parte del programa Copernicus, fueron combinadas con datos de campo y laboratorio, con la finalidad de caracterizar a los elementos traza y mapearlos, utilizando diferentes técnicas espectrométricas, permitiendo no solo identificar la presencia de estos elementos, sino también obtener precisiones aceptables que pueden ser utilizadas para establecer un sistema de monitoreo de largo plazo, enfocado en el seguimiento continuo y la gestión ambiental en suelo y explotaciones agro-forestales

Adicionalmente, la combinación de datos satelitales con mediciones in situ permite superar las limitaciones asociadas a la resolución espacial de las imágenes satelitales, haciendo posible una monitorización más precisa. Por lo tanto, la integración de estas tecnologías abre nuevas oportunidades para el desarrollo de sistemas de monitoreo ambiental accesibles, escalables y de bajo costo, que pueden ser aplicados en diversas regiones del mundo.

Objetivos Generales:

- Estudiar y caracterizar la contaminación de explotaciones agrícolas por metales pesados, a partir de espectrometría de imagen.

El objetivo general de este estudio se ha cumplido satisfactoriamente, demostrando que la espectrometría de imagen es una herramienta eficaz para estudiar y caracterizar la contaminación por metales pesados tanto en suelo como en explotaciones agro-forestales.

A través de la aplicación de técnicas espectrométricas, como: transformación de firmas espectrales, clasificación de longitudes de onda, correlación entre analíticas y firmas, entre otras, fue posible seleccionar bandas espectrales sensibles a los elementos traza estudiados, en suelo y vegetación.

De manera complementaria, la selección múltiple de estaciones muestrales es un proceso importante, ya que se basa en los límites permisibles establecidos por las normativas. Además, se busca identificar estaciones que estén afectadas exclusivamente por un solo metal pesado, lo que permite un análisis más preciso y controlado de la contaminación.

En función de la caracterización se emplearon diferentes técnicas de localización de metales pesados, obteniendo precisiones aceptables y buenas, en la mayoría de

elementos traza. Esto confirma que las técnicas espectrométricas de imagen son útiles y viables para evaluar la contaminación en explotaciones agrícolas.

- Diseñar y proponer un sistema de monitoreo de metales pesados en explotaciones agrícolas a partir de la integración de tecnologías geoespaciales y datos multifuente.

El diseño y propuesta de un sistema de monitoreo basado en la integración de tecnologías geoespaciales y datos multifuente fue un componente clave del estudio, y los resultados obtenidos validan este enfoque. La combinación de imágenes satelitales, datos in situ y otras fuentes de información geoespacial permitió crear un sistema robusto para la monitorización de metales pesados en explotaciones agrícolas a lo largo del tiempo (Figura 7.1).

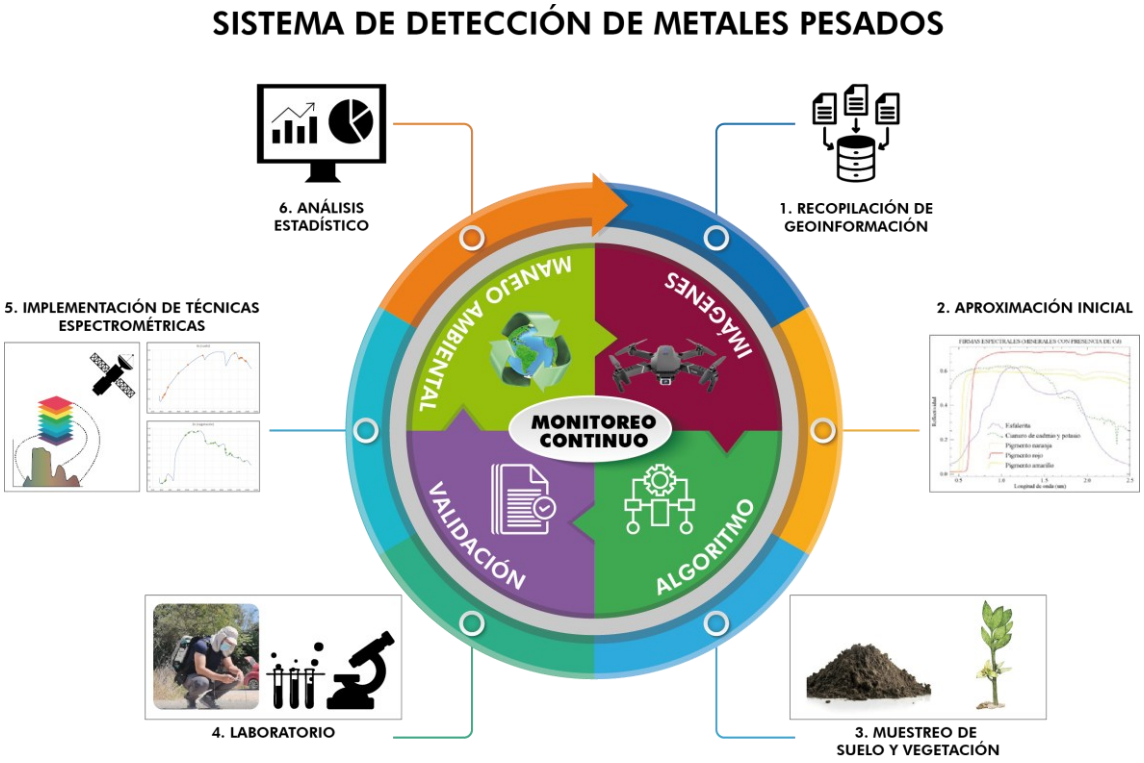


Figura 7.1: Sistema de monitoreo de metales pesados.

Como se puede evidenciar en la Figura 7.1, el flujo de proceso externo se relaciona con el método empleado en la presente investigación, y el flujo interno, denominado como monitoreo continuo, es considerado de bajo costo y de gran escala para la detección y seguimiento de metales pesados en suelos y vegetación, siendo trascendental para la gestión ambiental y la salud pública.

Objetivos Específicos:

- Caracterizar espectralmente a los metales pesados, evaluando las longitudes de onda diagnóstico en el espectro electromagnético.

Se realizó una aproximación inicial, mediante la técnica Crósta, a partir de los minerales característicos en el PRS: montmorillonita, sepiolita, calcita y yeso, y sus resultados fueron contrastados visualmente con información de entidades oficiales, obteniendo una alta similitud en aquellas zonas mapeadas por dichas instituciones, corroborando la utilidad de la técnica Crósta.

De forma similar, se realizó una aproximación inicial a partir de los minerales con presencia de metales pesados, siendo un insumo base para la definición de estaciones muestrales. Las analíticas y firmas espectrales derivadas de las estaciones, complementariamente con los límites permisibles extraídos de las normativas, fueron esenciales a la hora de seleccionar aquellas estaciones muestrales empleadas en el proceso de caracterización.

El proceso per se, de la caracterización espectral de cada uno de los metales pesados, en suelos y vegetación, se sustentó en el uso de diferentes técnicas espectrométricas, por ejemplo: 1ª derivada, 2ª derivada, eliminación de tendencia, correlación lineal con analíticas y empleo de clasificadores para extracción de bandas, lo que permitió realizar una selección múltiple de bandas espectrales, las cuales aíslan a los elementos traza en cuestión. Los resultados fueron contrastados con investigaciones científicas, y se evitó la repetibilidad de longitudes de onda en diferentes elementos traza.

En función de lo mencionado, la caracterización espectral fue lograda con éxito mediante la selección de longitudes de onda específicas en el espectro electromagnético y sensibles a los elementos traza, a través de la aplicación de técnicas espectrométricas avanzadas. Estos resultados confirman la efectividad de la espectrometría de imagen para la detección de metales pesados en explotaciones agro-forestales y ofrecen un marco de referencia útil para futuros estudios en otras áreas.

- Proponer y ajustar operadores, a partir de datos calibrados y bandas diagnóstico, para mapeo de elementos traza.

Se propusieron y ajustaron operadores espectrales para el mapeo de elementos traza en suelos y vegetación, haciendo uso principalmente de las matrices de

autovectores derivadas de los ACP. Mediante el análisis de dichas matrices se realiza la selección de una CP que puede contener información relacionada a un elemento traza, sobresaliendo dentro de este proceso 2 bandas que presentan cargas factoriales altas y de signos opuestos, las cuales fueron empleadas dentro del proceso de mapeo de elementos traza, a través de la generación de NDSI.

Cabe indicar que, es poco común encontrar elementos puros en la naturaleza, por ende, en función de los materiales heterogéneos levantados, de las analíticas realizadas y de las firmas espectrales capturadas, se ajustaron los operadores para la identificación de elementos traza en suelo y vegetación.

En resumen, la técnica Crósta fue empleada para ajustar los operadores que integran los diferentes algoritmos de índices espectrales, los cuales permiten localizar elementos traza y su aplicabilidad es amigable en comparación a otras técnicas, optimizando el proceso de mapeo.

- Diseñar la experimentación tanto geoespacial como in situ, elaborando zonas en las que implementar la metodología.

Una de las principales razones para la realización de la presente investigación es la importancia que tiene la UE como destino de varios productos que se origina en Ecuador, por ejemplo: banano, cacao, café, camarón, etc., y la normativa que ha implementado la UE sobre el límite permisible de metales pesados para la importación de dichos productos.

En función de esto el empleo de técnicas espectrométricas para la pronta identificación de zonas posiblemente contaminadas es esencial, evitando de esta forma que se puedan generar problemas de salud, controlar la contaminación ambiental y evitar pérdidas económicas por posibles rechazos de los productos.

Las áreas test de España (PRS y RG) y la zona de estudio de Ecuador (EC), fueron seleccionadas en función de la accesibilidad, la posibilidad de tomar muestras y obtener datos, la disponibilidad de geoinformación, la existencia de la problemática per se, la cercanía a lugares estratégicos, y la seguridad en el caso de Ecuador.

La aproximación inicial realizada permitió identificar, a partir de espectros puros, posibles zonas con presencia de elementos traza, en donde fueron planificadas las estaciones muestrales, cumpliendo con un 83% de la planificación en España y con un 90% en Ecuador. Cabe mencionar que, el muestreo empleado fue de tipo orientado.

La recolección de las muestras (suelo y vegetación), transporte, preparación física, digestión, análisis de concentraciones y obtención de firmas espectrales se lo realizó con base a estándares de la comunidad científica, evitando sobremanera la contaminación de muestras, la generación de errores groseros, la obtención de resultados equívocos, etc.

Por ende, el diseño de la experimentación es clave para los procesos subsiguientes, por ejemplo: derivación y transformación de firmas espectrales, selección de bandas, validación de resultados, etc. Adicionalmente, se elaboró un flujo de procesos que resume las actividades implementadas y los productos alcanzados dentro del mismo.

- Diseñar la adquisición de datos, procesarlos y calibrarlos según estándares admitidos en la comunidad científica.

La adquisición de datos se diseñó siguiendo estándares técnico - científicos, asegurando que la geoinformación obtenida fuera la adecuada para su análisis y procesamiento.

De manera puntual se utilizó un conjunto de imágenes de alta resolución de Sentinel-2, con nivel de procesamiento L2A y diferentes versiones, que fueron debidamente procesadas para asegurar su calidad y fiabilidad a la hora de obtener los valores de reflectividad. Por otro lado, las imágenes PRISMA, con niveles de procesamiento L2D, fueron georreferenciadas, con la finalidad de evitar resultados anómalos.

En cuanto al manejo del espectrorradiómetro se optó por la obtención de firmas en laboratorio, evitando el ruido existente al momento de capturar los datos directamente en campo. Cabe mencionar que, para la obtención de firmas se emplearon los suelos triturados (Ø < 0,25 mm) evitando errores analíticos ocasionados por el grano del material, y en cuanto a la vegetación, se trabajó con las hojas de muestras molidas (Ø < 0,5 mm).

En función de esto, la calibración de los datos siguió procedimientos estándar, lo que permitió la comparación entre los resultados obtenidos en Ecuador y los estudios previos realizados en España, garantizando la validez y coherencia de los resultados.

- Realizar la transferencia de tecnología en función de las habilidades, conocimientos y herramientas empleadas en las áreas test de España, a la zona de estudio en Ecuador.

La transferencia de tecnología permitió que las herramientas, conocimientos y habilidades desarrolladas en las áreas test de España fueran adaptadas y transferidas a Ecuador. Aunque se observaron algunas diferencias en las precisiones obtenidas en comparación con España, la metodología fue eficaz y adaptable al nuevo contexto. Esto demuestra que la transferencia de tecnología entre países con condiciones geográficas y ambientales diferentes es posible y efectiva, y abre la puerta para el uso de estas técnicas avanzadas en otras regiones del mundo.

El flujo de trabajo implementado, en términos generales, se caracteriza por los siguientes procesos: mapeo preliminar espectrométrico > definición de estaciones muestrales > obtención de analíticas y firmas espectrales > empleo de técnicas espectrométricas > validación de resultados.

- Validar los resultados obtenidos en función de análisis de laboratorio de las explotaciones agrícolas, in situ o pre existentes.

La validación de los resultados obtenidos en el estudio se realizó mediante las analíticas y los límites permisibles contemplados en las normativas, permitiendo de esta forma la delimitación de muestras de validación, categorizadas en presencia y ausencia de metales pesados, en función de mencionados límites.

Para el caso de EC, esto ha sido una de las limitantes, debido a que no se cuenta con un estudio de niveles de fondo y referencia de metales pesados, que permitan de una manera más precisa la categorización de las muestras. Cabe indicar que, este proceso permite confirmar la fiabilidad de las técnicas espectrométricas utilizadas y demuestra que las metodologías basadas en imágenes satelitales pueden complementarse eficazmente con mediciones de campo.

De manera cuantitativa, para el caso de la zona de estudio de PRS se cuenta con 12 muestras de suelo y 5 de vegetación, presentando un escaso número de muestras que sobrepasan los límites permisibles estipulados en la normativa. Por otro lado, el área test RG contiene 32 muestras en total (23 suelo y 9 vegetación) y la zona de estudio EC cuenta con 36 muestras (21 suelo y 15 cultivo), por ende, poseen una mayor representatividad a lo largo de las mismas. Tener un muestro más

densificado, hubiera incrementado el costo y los tiempos de la investigación, siendo innecesario debido a la finalidad del presente estudio.

En cuanto a la validación de los resultados obtenidos para la detección de metales pesados en suelo y vegetación, mediante diferentes técnicas espectrométricas y la aplicación de imágenes satelitales (Sentinel-2 y PRISMA) dentro de las áreas test, se deduce lo siguiente:

- Para el caso del As, las longitudes de onda seleccionadas coinciden en gran medida con investigaciones previas, y la técnica Crósta mostró buenos resultados, especialmente en vegetación, con precisiones superiores al 75% en el PRS. Sin embargo, se observó un rendimiento más bajo para el suelo. Los resultados para Cd fueron menos precisos en el suelo, aunque los análisis en vegetación dieron resultados aceptables, con una precisión del 56,4%.
- En cuanto al Cr, las precisiones fueron buenas para la vegetación en las áreas de test, especialmente en el PRS (70,5% en vegetación), pero se observaron diferencias en las longitudes de onda seleccionadas, lo que podría estar relacionado con las técnicas de transformación y clasificación empleadas en esta investigación. Similarmente, para el Cu, las precisiones fueron buenas para la vegetación (70,5%) y aceptables para el suelo, mostrando resultados comparables con estudios previos. En Hg, la técnica Crósta mostró precisiones superiores al 70% para suelo en el PRS, con el mejor rendimiento observado para esta zona.
- En el caso del Ni, los resultados obtenidos en la vegetación fueron aceptables, mientras que los de suelo mostraron precisiones más altas (80% en PRS). En cuanto al Pb, las precisiones fueron aceptables, especialmente en el PRS, con buenos resultados en la vegetación (superiores al 60%). Por último, en el caso del Zn, se lograron buenos resultados en el PRS, superando el 60% en ambas superficies, con precisiones más bajas al usar la imagen PRISMA.

Por otro lado, la validación de los resultados obtenidos en la transferencia de España a Ecuador. En general, las precisiones obtenidas en Ecuador fueron aceptables, pero con algunas diferencias con respecto a los resultados previos obtenidos en España:

- Para el caso del As, la CP4 mostró buenos resultados, con precisiones cercanas al 50%, siendo ligeramente mejores en vegetación que en suelo. El

uso del NDSI mejoró la precisión en suelo (>70%). En el caso del Cd, la selección de la CP4 y las bandas de mayor contraste espectral mejoraron las precisiones en suelo (>60%), aunque se observó una disminución en vegetación. Los índices espectrales también mostraron mejoras significativas en suelo, similar a los resultados de estudios previos.

- En la detección de Cr, la CP seleccionada mostró resultados similares a los obtenidos en las áreas test, con una mejora en el suelo y una leve disminución en la vegetación al aplicar el factor negativo. Los índices espectrales mejoraron las precisiones en suelo, pero disminuyeron ligeramente en vegetación. Para el Cu, se observó un leve empeoramiento en las precisiones en comparación con las áreas test, tanto en suelo como en vegetación. De igual forma, los índices espectrales mostraron un rendimiento inferior.
- Al trabajar con Hg, la precisión en suelo fue inferior a la obtenida en España, pero en vegetación se alcanzó una mejora significativa, superando el 90%. Para el Ni, la selección de CP y las bandas espectrales variaron con respecto a las áreas test, lo que resultó en menores precisiones en suelo, aunque las precisiones en vegetación fueron similares. Los índices espectrales mejoraron las precisiones en comparación con España.
- En cuanto al plomo Pb, las precisiones fueron aceptables, con una mejora en vegetación y una ligera disminución en suelo. Para el Zn, se utilizaron las mismas CP que en España, pero se aplicó un factor multiplicativo en suelo, obteniendo resultados levemente inferiores a los de España.

En resumen, se evidenció que, si bien las técnicas espectrales son una herramienta válida para la identificación de metales pesados en suelos y vegetación, las diferencias en las precisiones de los resultados se deben a la elección de las longitudes de onda, la técnica empleada, las características específicas del área de estudio, especialmente relacionado a la mixtura de objetos que componen un píxel, el número de estaciones muestrales, etc.

Adicionalmente, se recomienda que la técnica de Crósta no sea automatizada debido al análisis que debe ser realizado en función de la matriz de autovectores, mediante la cual se puede extraer la CP de interés y saber si es necesario aplicar el factor multiplicativo a dicha CP, caso contrario sucede con la derivación de NDSI, lo cual puede ser programado para la combinación de múltiples bandas y selección del resultado óptimo.

- Analizar la incidencia del uso de datos multifuente en la detección de metales pesados.

Comparando los datos de Sentinel-2 y PRISMA, se observó que, generalmente, Sentinel-2 proporcionó mejores resultados debido a su mayor número de estaciones muestrales, lo que permitió una mayor fiabilidad en la validación. Por otro lado, PRISMA mostró una mayor facilidad en la selección de bandas espectrales, pero con menores precisiones debido a un menor número de muestras disponibles.

Hipótesis de la investigación:

- A partir de datos multifuente en explotaciones agro-forestales se puede caracterizar espectralmente a los metales pesados, por sus bandas o longitudes de onda diagnóstico.

La hipótesis es válida. La investigación demuestra que los datos multifuente, especialmente aquellos obtenidos mediante imágenes satelitales, permiten caracterizar espectralmente los metales pesados en explotaciones agro-forestales con una precisión considerable. Al integrar imágenes satelitales (como las de Sentinel-2) con datos de campo y laboratorio, es posible identificar las longitudes de onda o bandas espectrales que son capaces de discriminar la presencia de elementos traza como: As, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Ni y Zn.

El presente estudio utilizó diversas técnicas espectrométricas, que permitieron seleccionar las bandas de diagnóstico óptimas para cada metal pesado. Los resultados obtenidos muestran que, mediante esta integración, es posible detectar diferencias en las concentraciones de metales pesados en suelos y vegetación.

Así, se confirma que los datos multifuente permiten caracterizar espectralmente los metales pesados, abriendo la posibilidad de utilizarlos para monitoreos medioambientales a gran escala y con alta precisión.

- La cobertura espacial de datos geoespaciales, procedentes de programas actuales, por ejemplo, Copernicus, integrados con tecnologías in situ, permiten el diseño de un sistema de monitorización preciso de presencia de metales pesados en explotaciones agro-forestales.

La hipótesis también es confirmada por los resultados de la investigación. Los datos geoespaciales de programas como Copernicus, que proporcionan imágenes

satelitales con alta frecuencia y resolución, son herramientas clave para diseñar un sistema de monitoreo preciso de la presencia de metales pesados en explotaciones agro-forestales.

La cobertura espacial de estos programas permite cubrir grandes áreas y realizar análisis detallados en regiones de difícil acceso. Al combinar estos datos con mediciones in situ, como las realizadas en campo para obtener valores exactos de concentración de metales pesados, se puede crear un sistema de monitoreo más robusto y preciso.

Este enfoque integrador facilita la creación de un sistema de monitoreo ambiental eficiente y preciso, permitiendo la detección temprana de contaminantes y ayudando en la toma de decisiones para la gestión sostenible de explotaciones agro-forestales.

En función de todo lo mencionado y realizado, se ha dado cumplimiento a cada uno de los objetivos propuestos en la presente investigación, se han respondido las preguntas diseñadas, y, se aceptan las hipótesis planteadas, debido a que, mediante el estudio se puede constatar que los metales pesados pueden ser caracterizados mediante datos multifuente, y, los programas de datos geoespaciales permiten diseñar un sistema de monitorización de metales pesados en suelo y en explotaciones agro-forestales.

7.2. Innovación de la tesis

Dentro de los aspectos más innovadores de la presente investigación se tiene los siguientes:

- Uso de datos multifuente para la caracterización espectral de metales pesados en suelos y explotaciones agro-forestales.
- Empleo de diferentes tecnologías geoespaciales para la detección de metales pesados mediante espectrometría de imágenes e integración de información con analíticas.
- Elaboración de un flujo de procesos que nace desde la recopilación de información hasta la validación de productos obtenidos.

- Propuesta de dos métodos para localización o mapeo de zonas con posible existencia de elementos traza.

7.3. Utilidad de la investigación

A pesar de la existencia de múltiples estudios relacionados a la determinación de la cantidad y afectación por parte de metales pesados en territorio ecuatoriano, existen escasos estudios, hasta el momento, en donde se emplea la espectrometría para la monitorización de estos elementos traza.

Adicionalmente, las restricciones implementadas por la Unión Europea en su normativa, exige más a los mercados que comercializan sus productos en territorio europeo, a tomar control permanente de cada uno de sus cultivos, desde la fase de siembra hasta su poscosecha.

Por ende, la investigación se centra en la integración de tecnologías geoespaciales y datos multifuente para el análisis de la presencia de metales pesados en explotaciones agrícolas, ayudando de esta forma a la toma de acciones oportunas por parte de los agricultores, sobre todo en aquellas zonas afectadas por estos elementos traza, evitando poner en riesgo a la salud humana y a la inversión realizada sobre sus terrenos.

Además, el diseño y propuesta del sistema de monitoreo permite al Gobierno Central detectar a nivel nacional la incidencia de elementos pesados en diferentes zonas agrarias, con la finalidad de incurrir en la implementación de acciones para mitigar el impacto negativo que trae consigo, y restricciones con respecto al manejo de residuos industriales.

Es de suma importancia la transferencia de tecnología realizado, en donde las habilidades, conocimiento y herramientas adquiridas, fueron trasladadas desde España a Ecuador, siendo el flujo metodológico adaptable en otras regiones y escalas, y podría ser de bajo costo al optar por la utilización de imágenes del programa Copernicus.

En cuanto a los beneficiarios directos de la presente investigación se puede mencionar a agricultores y productores agro-forestales, instituciones gubernamentales dedicadas a lo técnico (por ejemplo: MAG) e investigación (por ejemplo: INIAP), autoridades locales, investigadores y académicos, y, de manera indirecta los beneficiarios serían: consumidores de productos agrícolas, países

importadores de productos alimenticios, y, medio ambiente, política pública y sociedad en general, pudiendo implementar normativas más efectivas para la gestión del territorio.

7.4. Líneas futuras de investigación

En función de la presente investigación se proponen algunos ejes que buscan expandir y profundizar el conocimiento sobre la presencia de metales pesados en suelo y explotaciones agroforestales, integrando nuevas tecnologías, metodologías y enfoques interdisciplinarios.

Las propuestas que en este apartado se plantean no solo permitirán optimizar los métodos actuales de análisis y monitoreo, sino también abordarán desafíos emergentes relacionados con la sostenibilidad, la seguridad alimentaria y la salud ambiental. Dichas propuestas son las siguientes:

- Emplear cultivos contralados, expuestos a un determinado metal e ir evaluando su variabilidad espectral, teniendo en consideración el material edáfico sobre el que se desarrolla el cultivo.
- Trabajar con longitudes de onda promediadas cada 5 o 10 nm, evitando tener un exceso de información.
- Emplear algoritmos de detección no lineales para la selección de variables, por ejemplo: LASSO (*Least Absolute Shrinkage and Selection Operator*), GBDT (*Gradient Boosting Decision Tree*), entre otros.
- Utilizar técnicas espectrométricas adicionales para la localización o mapeo de posibles zonas con presencia de metales pesados, por ejemplo: clasificador *Spectral Angle Mapper* (SAM), regresión PLSR, etc.
- Analizar la correlación existente de los metales pesados con variables edáficas: contenido de materia orgánica, pH, CE, etc.
- Emplear un número mayor de firmas espectrales con alto contenido de elementos traza y corroborar las longitudes de onda caracterizadas.
- Incluir la 4ta derivada en el proceso de selección de variables, ya que la misma enfatiza cambios de composición y temperatura.
- Incorporar imágenes de diferentes temporalidades para verificar si el factor tiempo afecta el aislamiento de los elementos traza.

- Comparar los resultados obtenidos con datos que presentan mejores resoluciones espaciales y espectrales, incorporados en vehículos aéreos no tripulados.

7.5. Autoevaluación

El análisis FODA es una herramienta invaluable para identificar fortalezas, debilidades, oportunidades y amenazas, permitiendo visualizar las diferencias entre los puntos fuertes y los aspectos que deben mejorarse para alcanzar los objetivos propuestos.

En este contexto, la Figura 7.2 presenta un análisis FODA personal, elaborado en función del conocimiento y las habilidades adquiridas durante el proceso de investigación, reflejando una evaluación integral del aprendizaje y crecimiento obtenido.

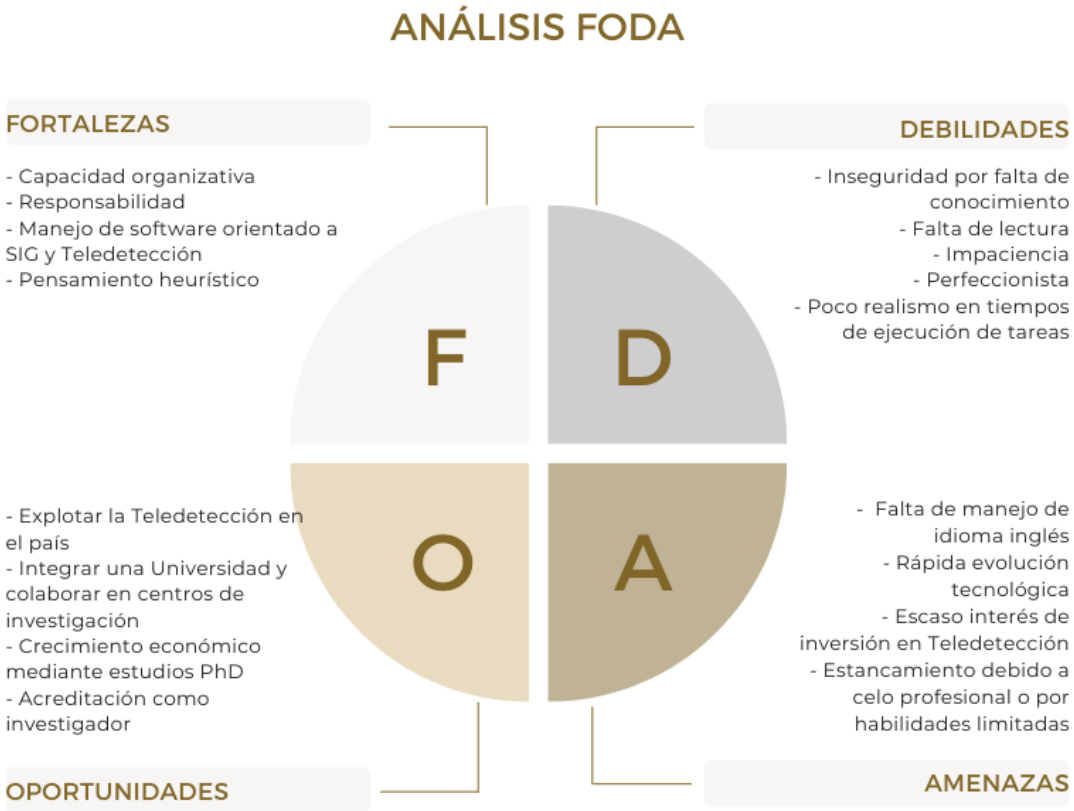


Figura 7.2: Análisis FODA personal.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

"Preciso es encontrar lo infinitamente grande en lo infinitamente pequeño, para sentir la presencia de Dios"

(Pitágoras)

Adriano, D. (2001). *Trace elements in terrestrial environments: Biogeochemistry, bioavailability, and risks of metals* (Second ed.). Springer.

Agyeman, P. C., Khosravi, V., Michael Kebonye, N., John, K., Borůvka, L., & Vašát, R. (2022). Using spectral indices and terrain attribute datasets and their combination in the prediction of cadmium content in agricultural soil. *Computers and Electronics in Agriculture, 198*, 107077. https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107077

Alam, M. G. M., Snow, E. T., & Tanaka, A. (2003). Arsenic and heavy metal contamination of vegetables grown in samta village, bangladesh. *Science of the Total Environment, 308*(1), 83–96. https://doi.org/10.1016/S0048-9697(02)00651-4

Alavipanah, S. K., Matinfar, H. R., Rafiei Emam, A., Khodaei, K., Hadji Bagheri, R., & Yazdan Panah, A. (2010). Criteria of selecting satellite data for studying land resources. *Desert, 15*(2), 83–102. https://jdesert.ut.ac.ir/article_23005_84c75c713314f36c4d5b0a203ffc9d59.pdf

Alcocer, K. (2017). *Respuesta espectral del cultivo de cacao (theobroma cacao L.) sobre un pasivo ambiental, en la provincia de sucumbíos* http://repositorio.espe.edu.ec/jspui/handle/21000/13583

Alvarez Morales, E., Guillin Llanos, X., & Rodríguez Angulo, D. (2021). Análisis de los efectos que produce la presencia del cadmio en el cultivo de cacao (theobroma cacao). *Ingeniería E Innovación, 9*(2) https://revistas.unicordoba.edu.co/index.php/rii/article/view/2723/3639

Andersen, A., Berge, S. R., Engeland, A., & Norseth, T. (1996). Exposure to nickel compounds and smoking in relation to incidence of lung and nasal cancer among nickel refinery workers. *Occupational and Environmental Medicine, 53*(10), 708–713. https://doi.org/https://doi.org/10.1136/oem.53.10.708

Antón-Pacheco, C., Gumiel, J. C., de Miguel, E., Gómez, J. A., Gutiérrez, O., & Rejas, J. G. (1999). Cartografía del vertido de lodos de la mina de aznalcóllar mediante imágenes daedalus ATM. Paper presented at the *VIII Congreso Nacional De Teledetección, , 12* 44–46. http://www.aet.org.es/congresos/viii/alb11.pdf

Araque, L., & Jiménez, A. (2009). Characterization of the spectral signature from remote sensors for the management of plant health in the oil palm crop. *30*(3) https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/1455/1455

Arellano, P., Tansey, K., Balzter, H., & Boyd, D. S. (2015). Detecting the effects of hydrocarbon pollution in the amazon forest using hyperspectral satellite images. *Environmental Pollution, 205*, 225–239. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.05.041

ASI. (2024). *PRISMA catalogue client.* ASI. Retrieved 2024, from http://prisma.asi.it/js-cat-client-prisma-src/

AVB. (2021). *Análisis de componentes principales – PCA – machine learning.* Solo para entendidos. Retrieved 2024, from https://www.soloentendidos.com/analisis-de-componentes-principales-pca-paso-a-paso-2539

Baatz, M., & Schäpe, A. (2000). Multiresolution segmentation: An optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung,* , 12–23. https://cir.nii.ac.jp/crid/1572261550679971840

Barthelmy, D. (2012). *Mineralogy database.* Mineralogy Database. Retrieved 2024, from http://www.webmineral.com/

Bayona-Penagos, L. (2020). Efecto y mitigación de la toxicidad por arsénico y cadmio en cultivo de arroz. *Revista Ciencias Agropecuarias (RCA), 6*(2), 49–70. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8658098

Benavides, M. P., Gallego, S. M., & Tomaro, M. L. (2005). Cadmium toxicity in plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology, 17*(1), 21–34. https://doi.org/10.1590/S1677-04202005000100003

Bezerra, E., & Neivaldo, C. (2011). Processamento digital de imagens: Análise em componentes principais–acp (técnica de crósta) e razão de bandas landsat–tm para realçar mármores e/ou minerais carbonáticos de município de independência–ce.

Bragado, E., Rejas, J. G., Marchamalo, M., & Bonatti, J. (2009). Delimitación de zonas de alteración hidrotermal en la cordillera volcánica central de costa rica mediante imágenes landsat y del sensor simulador MASTER. Paper presented at the *XIII Congreso De La Asociación Española De Teledetección,* 265–268. http://www.aet.org.es/congresos/xiii/cal67.pdf

Bragado-Massa, E., Marchamalo, M., Rejas, J. G., Bonatti, J., Martínez-Frías, J., & Martínez, R. (2014). Monitoring hydrothermal alteration in active volcanoes using remote sensing: The case of turrialba volcano (costa rica). *Revista Geológica De América Central,* (51), 69–82. 10.15517

Cabrera, F., Bustos, M., & Astudillo, T. (2012). Obtención de firmas espectrales de 6 diferentes superficies mediante la utilización del espectrorradiómetro exotech 100 AXM + T. *Teledetección,* https://www.researchgate.net/publication/349064210_OBTENCION_DE_FIRMAS_ESPECTRALES_DE_6_DIFERENTES_SUPERFICIES_MEDIANTE_LA_UTILIZACION_DEL_ESPECTRORADIOMETRO_EXOTECH_100_AXM_T

Cabrera-Torres, F., & López García, M. J. (2016). Viabilidad de imágenes landsat (ETM y OLI) para la determinación de conflictos de uso de la tierra en el cantón portoviejo, ecuador. Paper presented at the *Aplicaciones Geotecnológicas Para El Desarrollo Económico Sostenible: XVII Congreso Nacional De Tecnologías De La Información Geográfica,* 28–39.

Camo Analytics. (2024). Unscrambler [computer software]

Campbell, J. B., & Wynne, R. H. (2011). *Introduction to remote sensing* (Fifth ed.). Guilford Press.

Cao, J., & Yang, H. (2023). A dynamic normalized difference index for estimating soil organic matter concentration using visible and near-infrared spectroscopy. *Ecological Indicators, 147*, 110037. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110037

Carrera-Quispe, J. (1994). *Evaluación del contenido de cadmio en el sistema suelo-cacao de varias zonas del ecuador* http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=eetp3.xis&method=post&formato=2&cantidad=1&expresion=mfn=000494

Casteblanco, J. A. (2018). Técnicas de remediación de metales pesados con potencial aplicación en el cultivo de cacao. *LA GRANJA.Revista De Ciencias De La Vida, 27*(1), 21–35.

Castillejo, D. G. (2019, August 28). Ecologistas piden investigar un vertido de lodos de aguas residuales en el parque regional del sureste. https://www.noticiasparamunicipios.com/municipios-madrid/pinto-ecologistas-piden-investigar-un-vertido-de-lodos-de-aguas-residuales-en-el-parque-regional-del-sureste/

Catalyst. (2024). *Object analyst classification.* CATALYST. Retrieved 2024, from https://catalyst.earth/tutorial/object-analyst-classification-2/

CCME. (2024). *Canadian environmental quality guidelines (CEQGs) provide science-based goals for the quality of aquatic and terrestrial ecosystems.* Retrieved 2024, from https://ccme.ca/en/current-activities/canadian-environmental-quality-guidelines

Centro Español de Metrología. (2009). Procedimiento op-003 para la calibración de espectrorradiómetros. https://www.cem.es/sites/default/files/op-003_digital_0.pdf

Chávez, P., Zorogastúa, P., Chuquillanqui, C., Salazar, L. F., Mares, V., & Quiroz, R. (2009). Assessing potato yellow vein virus (PYVV) infection using remotely sensed data. *International Journal of Pest Management, 55*(3), 251–256. https://doi.org/10.1080/09670870902862685

Chuvieco, E. (2010). *Teledetección ambiental* (Tercera ed.). Ariel.

Clark, R. (1999). Spectroscopy of rocks and minerals, and principles of spectroscopy. https://www.ugpti.org/smartse/research/citations/downloads/Clark-Manual_Spectroscopy_Rocks_Minerals_Book-1999.pdf

CM. (2019). *Datos abiertos de la comunidad de madrid*

Comisión Europea. (2014, May 12). *Reglamento (UE) n° 488/2014 de la comisión.* EUR-Lex. Retrieved Nov 3, 2020, from https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/ALL/?uri=CELEX%3A32014R0488

Congalton, R. G. (1991). A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment, 37*(1), 35–46.

Cremona, A., & Orsenigo, C. (2024). Copper perspectives. *Chimica & L'Industria, 24*(3) https://www.soc.chim.it/sites/default/files/chimind/pdf/2024_3_74_ca.pdf

Crósta, A. P., De Souza Filho, C. R., Azevedo, F., & Brodie, C. (2003). Targeting key alteration minerals in epithermal deposits in patagonia, argentina, using ASTER imagery and principal component analysis. *International Journal of Remote Sensing, 24*(21), 4233–4240. https://doi.org/10.1080/0143116031000152291

Crósta, A. P., & McM.Moore, J. (1989). Enhancement of landsat thematic mapper imagery for residual soil mapping in SW minas gerais state brazil: A prospecting case history in greenstone belt terrain. Paper presented at the

Proceedings of the 7th ERIM Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology, 1989, 1173–1187.

CSIC. (2018). *Método de ensayo para la determinación de elementos totales por ICP en muestras sólidas y líquidas tras digestión ácida.* Unpublished manuscript.

Das, B., Manohara, K. K., Mahajan, G. R., & Sahoo, R. N. (2020). Spectroscopy based novel spectral indices, PCA- and PLSR-coupled machine learning models for salinity stress phenotyping of rice. *Spectrochimica Acta Part A-Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 229*, 1–13. https://doi.org/10.1016/j.saa.2019.117983

Davids, C., & Tyler, A. N. (2003). Detecting contamination-induced tree stress within the chernobyl exclusion zone. *Remote Sensing of Environment, 85*(1), 30–38. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00184-0

de Miguel, E., Callaba, A., Arranz, J., Cala, V., Chacón, E., Gallego, E., Alberruche, E., Alonso, C., Fdez-Canteli, P., Iribarren, I., & Palacios, H. (2002). In Baretino D., Callaba A.(Eds.), *Determinación de niveles de fondo y niveles de referencia de metales pesados y otros elementos traza en suelos de la comunidad de madrid*. Instituto Geológico y Minero de España.

Dunagan, S. C., Gilmore, M. S., & Varekamp, J. C. (2007). Effects of mercury on visible/near-infrared reflectance spectra of mustard spinach plants (brassica rapa P.). *Environmental Pollution, 148*(1), 301–311. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.10.023

Durães, N., Novo, L. A. B., Candeias, C., & Da Silva, E. F. (2017). Distribution, transport and fate of pollutants. *Soil pollution: From monitoring to remediation* (pp. 29–57). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-849873-6.00002-9

EFSA. (2020). *European food safety authority.* Retrieved 2024, from https://www.efsa.europa.eu/en/publications

Eibe, F. (2023). *Merit of best subset found & methods*

EPA. (2015, -11-30T09:56:00-05:00). *National primary drinking water regulations.* US EPA. Retrieved Jul 31, 2020, from https://www.epa.gov/ground-water-and-drinking-water/national-primary-drinking-water-regulations

Ernst, W. H. O. (1995). Sampling of plant material for chemical analysis. *Science of the Total Environment, 176*(1), 15–24. https://doi.org/10.1016/0048-9697(95)04826-X

ESA. (2015). *Agency - sentinel-2.* ESA. Retrieved 2024, from https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Spain/SENTINEL_2

ESA. (2024a). *Copernicus browser.* Copernicus browser. Retrieved 2024, from https://browser.dataspace.copernicus.eu/

ESA. (2024b). *Searchable table of earth observation satellite instruments.* Retrieved 2024, from https://database.eohandbook.com/database/instrumenttable.aspx

ESA. (2024c). *Sentinel-2.* ESA. Retrieved 2024, from https://sentiwiki.copernicus.eu/web/sentinel-2

ESA. (2024d). *SentiWiki - sentinel-2.* ESA. Retrieved 2024, from https://sentiwiki.copernicus.eu/web/sentinel-2

ESRI. (2020). Basemap by GIS [computer software]

FAO. (2015). *Suelos sanos para una vida sana.* https://www.fao.org/fileadmin/user_upload/GSP/WSD2018/headers/translations/GSP_Soil_Nutrition_ES_001b.pdf

FAO. (2021). *Textura del suelo.* Retrieved 2024, from https://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s06.htm#top

Félix, I., Mite, F., Carrillo, M., & Pino, M. (2002). Avances de investigación del proyecto determinación de metales contaminantes en cultivos de exportación y su repercusión sobre la calidad de los mismos. Paper presented at the *VIII Congreso Ecuatoriano De La Ciencia Del Suelo,* 1–8. http://www.secsuelo.org/wp-content/uploads/2015/06/5-Determinacion-de-metales-contaminantes-Felix-I.pdf

Feng, X., Chen, H., Chen, Y., Zhang, C., Liu, X., Weng, H., Xiao, S., Nie, P., & He, Y. (2019). Rapid detection of cadmium and its distribution in miscanthus sacchariflorus based on visible and near-infrared hyperspectral imaging. *Science of the Total Environment, 659*, 1021–1031. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.458

Feoktistova, L., & Clark, Y. (2018). El metabolismo del cobre. sus consecuencias para la salud humana. *Medisur, 16*(4), 579–587. http://scielo.sld.cu/pdf/ms/v16n4/ms13416.pdf

Fonseca, D. (2016, Nov 21). La espuma que amenaza el jarama. *El País* https://elpais.com/ccaa/2016/11/18/madrid/1479493270_099128.html

Fresno Garcia, M. T. (2017). Enmiendas de hierro y materiales orgánicos para la recuperación de suelos contaminados con arsénico y cobre. https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=65886

Galán, E., & Romero, A. (2008). Contaminación de suelos por metales pesados. *Revista De La Sociedad Española De Mineralogía, 10*, 48–60. http://www.ehu.eus/sem/macla_pdf/macla10/Macla10_48.pdf

Gallwey, J., Robiati, C., Coggan, J., Vogt, D., & Eyre, M. (2020). A sentinel-2 based multispectral convolutional neural network for detecting artisanal small-scale mining in ghana: Applying deep learning to shallow mining. *Remote Sensing of Environment, 248*, 111970. https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111970

GeoScene. (2023). *Principal component analysis.* Retrieved 2024, from https://envi.geoscene.cn/help/Subsystems/envi/Content/PreprocessImagery/Transforms/PrincipalComponentAnalysis.htm

Gholizadeh, A., Borůvka, L., Vašát, R., Saberioon, M., Klement, A., Kratina, J., Tejnecký, V., & Drábek, O. (2015). Estimation of potentially toxic elements contamination in anthropogenic soils on a brown coal mining dumpsite by reflectance spectroscopy: A case study. *PloS One, 10*(2), e0117457. https://doi.org/https://doi.org/10.1371/journal.pone.0117457

Gil, I. (2016). *Rocas y minerales.* Retrieved 2024, from https://www.rocasyminerales.net/

Gilabert, M. A., González-Piqueras, J., & Martínez, B. (2010). 1. theory and applications of vegetation indices. In F. Maselli, M. Menenti & P. A. Brivio (Eds.), *Remote sensing optical observations of vegetation properties* (pp. 1–43). Research Signpost.

GIZ. (2021). *Responsible mining in the andean countries.* Retrieved Oct 28, 2024, from https://www.giz.de/en/worldwide/25042.html

Gobierno de México. (2015). *Subdivisión de sustancias químicas.* Retrieved Oct 28, 2024, from http://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/programa-de-las-naciones-unidas-para-el-medio-ambiente-pnuma

González Fernández, A. B., Rodríguez-Pérez, J. R., Sanz Ablanedo, E., Álvarez Taboada, M. F., & Catanzarite Torres, T. (2010). Determinación de la variabilidad espacial de parámetros de calidad y rendimiento en viñedos a partir de índices de vegetación obtenidos con un espectro-radiómetro de campo. Paper presented at the *XIV Congreso Nacional De Tecnologías De La Información Geográfica,* 148–161. https://idus.us.es/handle/11441/66291

González, P. (2023). Los mecheros de las petroleras que apagan vidas en la amazonía. https://www.primicias.ec/noticias/economia/mecheros-petroleras-comunidades-amazonia/

Google. (2021). *Google MyMaps.* Retrieved 2024, from https://www.google.com/maps/d/u/0/?hl=es

Goyer, R. A., & Clarkson, T. W. (1996). *Toxic effects of metals*. McGraw-Hill New York.

Gu, Y. W., Li, S., Gao, W., & Wei, H. (2015). Hyperspectral estimation of the cadmium content in leaves of brassica rapa chinesis based on the spectral parameters. *Acta Ecologica Sinica, 35*(13), 4445–4453.

Hewitt, C. N., & Candy, G. B. B. (1990). Soil and street dust heavy-metal concentrations in and around cuenca, ecuador. *Environmental Pollution, 63*(2), 129–136. https://doi.org/10.1016/0269-7491(90)90063-I

Holmgren, P., & Thuresson, T. (1998). Satellite remote sensing for forestry planning - A review. *Scandinavian Journal of Forest Research, 13*(1), 90–110. https://doi.org/10.1080/02827589809382966

IGM. (2024). Geoportal ecuador – infraestructura de datos espaciales. https://www.geoportaligm.gob.ec/portal/

IGME. (1998). *Cartografía geológica del Instituto geológico y minero de españa*

IGN. (2011). *Sistema de información de ocupación del suelo de españa*

IGN. (2019). *Centro nacional de información geográfica del instituto geográfico nacional*

IHOBE. (2002). *Investigación de la contaminación del suelo, manual práctico*

IIGE. (2017). *Mapas geológicos 2017 – 2018 – instituto de investigación geológico y energético.* Retrieved 2024, from https://www.geoenergia.gob.ec/mapas-geologicos/

IISD. (2014). An overview of the GEF's funding for chemicals. https://sdg.iisd.org/commentary/guest-articles/an-overview-of-the-gefs-funding-for-chemicals/

Ingeoexpert. (2024). Configuración, estructura y características de las imágenes en teledetección. https://ingeoexpert.com/articulo/21969/

INIAP, & MAG. (2017). *Ciclo del cultivo del cacao.* EVA INIAP. Retrieved Aug 13, 2020, from https://eva.iniap.gob.ec/web/cacao/

Instituto de Estadística de la CM. (2023). *Barrios del municipio de madrid.* Retrieved 2024, from https://www.madrid.org/iestadis/fijas/clasificaciones/barrios.htm

Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía. (2024). *Instituto de estadística y cartografía de Andalucía | Datos espaciales de referencia de andalucía (DERA).* Datos estadísticos y geoespaciales. Retrieved 2024, from https://www.juntadeandalucia.es/institutodeestadisticaycartografia/dega/datos-espaciales-de-referencia-de-andalucia-dera

ITC. (2020). *Trade map - trade statistics for international business development.* Trade Map. Retrieved Aug 17, 2020, from https://www.trademap.org/Index.aspx

Ivars, L. (2011). Café geodésico: Sobre NTRIP. http://cafegeodesico.blogspot.com/2011/10/sobre-ntrip.html

Jaishankar, M., Tseten, T., Anbalagan, N., Mathew, B. B., & Beeregowda, K. N. (2014). Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. *Interdisciplinary Toxicology, 7*, 60–72. https://doi.org/https://doi.org/10.2478/intox-2014-0009

JECFA. (2020). *Evaluations of the joint FAO/WHO expert committee on food additives (JECFA).* WHO | JECFA. Retrieved July 31, 2020, from https://apps.who.int/food-additives-contaminants-jecfa-database/

Ley 10/1998, de 21 de abril, de residuos, (1998). https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-1998-9478

JPL. (2018, Feb 2). *ECOSTRESS speclib de jet propulsion laboratory.* ECOSTRESS Speclib. Retrieved May 12, 2021, from https://speclib.jpl.nasa.gov/library

Junta de Andalucía. (2019). *Red de información ambiental de andalucía - portal ambiental de andalucía.* REDIAM. Retrieved 2024, from https://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/portal/acceso-rediam

Kido, T., Nogawa, K., Honda, R., Tsuritani, I., Ishizaki, M., Yamada, Y., & Nakagawa, H. (1990). The association between renal dysfunction and osteopenia in environmental cadmium-exposed subjects. *Environmental Research, 51*(1), 71–82. https://doi.org/10.1016/S0013-9351(05)80183-5

Kim, H., Yu, J., Wang, L., Jeong, Y., & Kim, J. (2020). Variations in spectral signals of heavy metal contamination in mine soils controlled by mineral assemblages. *Remote Sensing, 12*(20), 3273. https://doi.org/https://doi.org/10.3390/rs12203273

Kooistra, L., Leuven, R., Wehrens, R., Nienhuis, P. H., & Buydens, L. (2003). A comparison of methods to relate grass reflectance to soil metal

contamination. *International Journal of Remote Sensing, 24*(24), 4995–5010. https://doi.org/10.1080/0143116031000080769

Lema, V. H. (2020). *Informe de rendimientos objetivos de cacao (almendra seca) 2019 .* . Quito - Ecuador: http://sipa.agricultura.gob.ec/descargas/estudios/rendimientos/cacao/rendimiento_cacao_2019.pdf

Lenntech. (2024). *Tabla periódica de los elementos.* Retrieved 2024, from https://www.lenntech.es/periodica/tabla-periodica.htm

Liu, J., Zhang, Y., Wang, H., & Du, Y. (2018). Study on the prediction of soil heavy metal elements content based on visible near-infrared spectroscopy. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 199*, 43–49. https://doi.org/10.1016/j.saa.2018.03.040

Londoño-Franco, L., Londoño-Muñoz, P., & Muñoz-García, F. (2016). Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial, 14*(2), 145–153. doi:10.18684/BSAA(14)145-153

Loughlin, W. P. (1991). Principal component analysis for alteration mapping. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 57*(9), 1163–1169. https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0026358558&partnerID=40&md5=c6ed76b347654f86a9ffe035c70ab83b

Lozano-Rodríguez, E., Luguera, M., Lucena, J. J., & Carpena-Ruiz, R. O. (1995). Evaluation of two different acid digestion methods in closed systems of trace elements determination in plants. *Quimica Analytica, 14*, 2730.

Lu, Q., Wang, S., Bai, X., Liu, F., Tian, S., Wang, M., & Wang, J. (2020). Rapid estimation of soil heavy metal nickel content based on optimized screening of near-infrared spectral bands. *Acta Geochimica, 39*(1), 116–126. https://doi.org/10.1007/s11631-019-00357-7

Libro VI de la calidad ambiental, (2015). https://ecuadorforestal.org/wp-content/uploads/2010/05/Libro-VI-Calidad-Ambiental.pdf

Principal component analysis (PCA): Understand it by manual calculation on excel. Made Simple (Director). (2020).[Video/DVD] Malasia: https://www.youtube.com/watch?v=eAcYYH9pKQ4&t=15s

MAG. (2019, Apr 18). *Ecuador continuará como el principal exportador de cacao fino de aroma.* MAG. Retrieved August 24, 2020, from https://www.agricultura.gob.ec/ecuador-continuara-como-el-principal-exportador-de-cacao-fino-de-aroma/#:~:text=La%20participaci%C3%B3n%20del%20pa%C3%ADs%20dej%C3%B3,este%20producto%20a%20escala%20mundial.

MAG. (2020). *Boletín situacional cacao 2018.* . Quito - Ecuador: http://sipa.agricultura.gob.ec/boletines/situacionales/2018/boletin_situacional_cacao_2018.pdf

MAG - CGSIN. (2021). *Afectación de cacao por cadmio*

Maldonado, Y. (2017). Geología y sus ramas. https://geologiaweb.com/

Malvern Panalytical. (2015). FieldSpec 4™ user manual.

Malvern Panalytical. (2024). *Gama de equipos ASD FieldSpec.* Retrieved 2024, from https://www.malvernpanalytical.com/es/products/product-range/asd-range/

MAPAMA. (1994). Tomo III: Suelos y aguas para riego. *Ministerio De Agricultura, Pesca Y Alimentación,*

Margesin, R., & Schinner, F. (2005). *Manual for soil analysis-monitoring and assessing soil bioremediation*. Springer Science & Business Media.

Marshall, C. P., & Fairbridge, R. W. (1999). *Encyclopedia of geochemistry*. Springer Science & Business Media.

McClintock, T. R., Chen, Y., Bundschuh, J., Oliver, J. T., Navoni, J., Olmos, V., Lepori, E. V., Ahsan, H., & Parvez, F. (2012). Arsenic exposure in latin america: Biomarkers, risk assessments and related health effects. *Science of the Total Environment, 429*, 76–91. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.08.051

Medina-Pizzali, M., Robles, P., Mendoza, M., & Torres, C. (2018). Ingesta de arsénico: El impacto en la alimentación y la salud humana. *Revista Peruana De Medicina Experimental Y Salud Pública, 35*, 93–102. https://doi.org/10.17843/rpmesp.2018.351.3604

Meza, K., Ruales, B., Maiguashca, J., & Rivadeneira, J. L. (2020). Caracterización espectral de estrés hídrico en el cultivo de pepino dulce (solanum muricatum). *Geoespacial, 17*(1), 14–24. https://journal.espe.edu.ec/ojs/index.php/revista-geoespacial/article/view/1492

Mite, F., Carrillo, M., & Durango, W. (2010). Avances del monitoreo de presencia de cadmio en almendras de cacao, suelos y aguas en ecuador. Paper presented at the *XII Congreso Ecuatoriano De La Ciencia Del Suelo,* 1–21. http://www.secsuelo.org/wp-content/uploads/2015/06/6.-Francisco-Mite.-Cadmio.-INIAP.pdf

MOCCA. (2021). MOCCA: Ecuador lidera esfuerzos regionales para mitigar cadmio en cacao - MOCCA. https://mocca.org/en/mocca-ecuador-is-spearheading-regional-efforts-to-mitigate-cadmium-in-cacao/

Mora, M. G., & Cañarte, D. (2017). *Relación de la variación espectral mediante índices de vegetación en quinua (chenopodium quinoa) en un ensayo controlado y un cultivo comercial* https://repositoriobe.espe.edu.ec/server/api/core/bitstreams/9edee7ed-b61e-4d79-8279-00303ac90a34/content

N. Ghoggali, F. Melgani, & Y. Bazi. (2009). A multiobjective genetic SVM approach for classification problems with limited training samples. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 47*(6), 1707–1718. https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.2007128

Nakagawa, H., Tabata, M., Morikawa, Y., Senma, M., Kitagawa, Y., Kawano, S., & Kido, T. (1990). High mortality and shortened life-span in patients with itai-itai disease and subjects with suspected disease. *Archives of Environmental Health, 45*(5), 283–287. https://doi.org/10.1080/00039896.1990.10118747

Navarro-Aviñó, J. P., Aguilar-Alonso, I., & López-Moya, J. R. (2007). Aspectos bioquímicos y genéticos de la tolerancia y acumulación de metales pesados en plantas. *Revista Ecosistemas, 16*(2), 10–25. https://revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/125

Nosetto, M., Brizuela, A., & Aceñolaza, P. (2003). Obtención de firmas espectrales en forestaciones a partir de imágenes landsat. *CIT Información Tecnológica, 14*(4), 83–89. https://www.researchgate.net/publication/261995516_Obtencion_de_Firmas_Espectrales_en_Forestaciones_a_partir_de_imagenes_Landsat

NV5. (2024). *Hyperspectral analysis: SAM and SFF tutorial.* NV5. Retrieved 2024, from https://www.nv5geospatialsoftware.com/docs/Whole-Pixel_Hyperspectral_Analysis_Tutorial.html

OMS. (2011). *Guidelines for drinking-water quality* (Fourth ed.). Gutenberg.

Pandey, B., Agrawal, M., & Singh, S. (2014). Assessment of air pollution around coal mining area: Emphasizing on spatial distributions, seasonal variations and heavy metals, using cluster and principal component analysis. *Atmospheric Pollution Research, 5*(1), 79–86. https://doi.org/10.5094/APR.2014.010

Parrot Drones. (2016). *Parrot sequoia.* Parrot. Retrieved August 13, 2020, from https://www.parrot.com/files/s3fs-public/sequoia_official_documentation_and_specifications_2016_0.pdf

Pereira, I., Alcalde-Aparicio, S., Ferrer-Julià, M., Carreño, M. F., & García-Meléndez, E. (2023). Monitoring sedimentary areas from mine waste products with Sentinel-2 satellite images: A case study in the SE of spain. *European Journal of Soil Science, 74*(1), e13336. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/ejss.13336

Peris Mendoza, M. (2006). *Estudio de metales pesados en suelos bajo cultivos hortícolas de la provincia de castellón* https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=7192

Plum, L. M., Rink, L., & Haase, H. (2010). The essential toxin: Impact of zinc on human health. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 7*(4), 1342–1365. https://doi.org/10.3390/ijerph7041342

Ramírez, H. (2015). Importancia de la espectroradiometría en aplicaciones geográficas a partir de percepción remota. Paper presented at the *GIS Day SGC 2015,* 1–46. https://www2.sgc.gov.co/sgc/mapas/Documents/PDF%20PRESENTACI%C3%93N%20D%C3%8DA%20SIG/IGAC_CIAF_ESPECTROMETRIA.pdf

Rejas, J. G., Martínez, R., & Malpica, J. (2007). Hyperspectral remote sensing application for semi-urban areas monitoring. Paper presented at the *Urban Remote Sensing Joint Event,* 1–5. https://doi.org/10.1109/URS.2007.371806 https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-34648822737&doi=10.1109%2fURS.2007.371806&partnerID=40&md5=9b15556bd3f916dfcb49cdc447958bb9

Rejas, J. G., Martínez-Frías, J., Martínez, R., Marchamalo, M., & Bonatti, J. (2014). Spectral analysis of geological materials in the central volcanic range

of costa rica and its relationship to the remote detection of anomalies. *Estudios Geologicos, 70*(2)https://doi.org/10.3989/egeol.41711.313

Ren, H., Zhuang, D., Pan, J., Shi, X., Shi, R., & Wang, H. (2010). Study on canopy spectral characteristics of paddy polluted by heavy metals. *Spectroscopy and Spectral Analysis, 30*(2), 430–434.

Ren, H., Zhuang, D., Singh, A. N., Pan, J., Qiu, D., & Shi, R. (2009). Estimation of as and cu contamination in agricultural soils around a mining area by reflectance spectroscopy: A case study. *Pedosphere, 19*(6), 719–726. https://doi.org/10.1016/S1002-0160(09)60167-3

Reyes, Y., Vergara, I., Torres, O., Lagos, M. D., & Jimenez, E. E. G. (2016). Contaminación por metales pesados: Implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Ingeniería Investigación Y Desarrollo: I2 D, 16*(2), 66–77. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6096110

Reyna Mandujano, S. C. (2023). *Eficiencia de las técnicas de fitorremediación en metales pesados basado en artículos científicos en el periodo 2017-2022* https://hdl.handle.net/20.500.12952/8619

Rodríguez Heredia, D. (2017). Intoxicación ocupacional por metales pesados. *Medisan, 21*(12), 3372–3385. http://scielo.sld.cu/pdf/san/v21n12/san122112.pdf

Rodríguez, J., & Alvarado, D. (2015). *Propuesta de un plan de manejo ambiental, en base a la presencia de metales pesados en el estero huaylá, puerto bolívar* https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/8163

Rodríguez-Pérez, J. R., Marcelo, V., Pereira-Obaya, D., García-Fernández, M., & Sanz-Ablanedo, E. (2021). Estimating soil properties and nutrients by visible and infrared diffuse reflectance spectroscopy to characterize vineyards. *Agronomy, 11*(10)https://doi.org/10.3390/agronomy11101895

Rokad, B. (2019). Machine learning approaches and its applications. https://medium.datadriveninvestor.com/machine-learning-approaches-and-its-applications-7bfbe782f4a8

Ross, S. M. (1994). Toxic metals in soil-plant systems.

Rosso, P. H., Pushnik, J. C., Lay, M., & Ustin, S. L. (2005). Reflectance properties and physiological responses of salicornia virginica to heavy metal and petroleum contamination. *Environmental Pollution, 137*(2), 241–252. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2005.02.025

Sá, I. B., R., A., & Almorox, J. A. (1999). Aplicación de sensores remotos en la detección y evaluación de plagas y enfermedades en la vegetación. Paper presented at the *VIII Congreso Nacional De Teledetección,* 64–67. http://www.aet.org.es/congresos/viii/alb16.pdf

Saha, A., Sen Gupta, B., Patidar, S., & Martínez-Villegas, N. (2022). Identification of soil arsenic contamination in rice paddy field based on hyperspectral reflectance approach. *Soil Systems, 6*(1), 30.

Saha, J. C., Dikshit, A. K., Bandyopadhyay, M., & Saha, K. C. (1999). A review of arsenic poisoning and its effects on human health. *Critical Reviews in*

Environmental Science and Technology, 29(3), 281–313. https://doi.org/10.1080/10643389991259227

San Sebastián, M., Tanguila, A., Santi, S., Armstrong, B., Stephes, C., & Córdoba, J. (2004). *Informe yana curi, impacto de la actividad petrolera en la salud de poblaciones rurales de la amazonía ecuatoriana*. ABYA-YALA.

Sánchez-Camazano, M., Sánchez-Martín, M. J., & Lorenzo, L. F. (1994). Lead and cadmium in soils and vegetables from urban gardens of salamanca (spain). *Science of the Total Environment, 147*, 163–168. https://doi.org/10.1016/0048-9697(94)90233-X

Sandroni, V., & Smith, C. M. M. (2002). Microwave digestion of sludge, soil and sediment samples for metal analysis by inductively coupled plasma–atomic emission spectrometry. *Analytica Chimica Acta, 468*(2), 335–344. https://doi.org/10.1016/S0003-2670(02)00655-4

Sastre, J. (2007). *Los minerales industriales.* . https://www.uhu.es/jc.caliani/pdf/MinIndustrialesMadrid.pdf

Schmid, T. (2021). *Espectrorradiometría en laboratorio.* Unpublished manuscript.

Schmid, T., Rodríguez-Rastrero, M., Escribano, P., Palacios-Orueta, A., Ben-Dor, E., Plaza, A., Milewski, R., Huesca, M., Bracken, A., Cicuéndez, V., Pelayo, M., & Chabrillat, S. (2016). Characterization of soil erosion indicators using hyperspectral data from a mediterranean rainfed cultivated region. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 9*(2), 845–860. https://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2462125

senseFly Parrot Group. (2018). *Parrot sequoia+.* senseFly. Retrieved Aug 13, 2020, from https://www.sensefly.com/camera/parrot-sequoia/

Sergieieva, K. (2022). *Imágenes históricas de satélite: Acceso a datos antiguos.* EOS Data Analytics. Retrieved 2024, from https://eos.com/es/blog/imagenes-historicas-de-satelite/

Serrano, J., Shahidian, S., Marques da Silva, J., Paixão, L., Carreira, E., Carmona-Cabezas, R., Nogales-Bueno, J., & Rato, A. E. (2020). Evaluation of near infrared spectroscopy (NIRS) and remote sensing (RS) for estimating pasture quality in mediterranean montado ecosystem. *Applied Sciences, 10*(13)https://doi.org/10.3390/app10134463

Shelnutt, S. R., Goad, P., & Belsito, D. V. (2007). Dermatological toxicity of hexavalent chromium. *Critical Reviews in Toxicology, 37*(5), 375–387. https://doi.org/10.1080/10408440701266582

Shi, T., Chen, Y., Liu, Y., & Wu, G. (2014). Visible and near-infrared reflectance spectroscopy—An alternative for monitoring soil contamination by heavy metals. *Journal of Hazardous Materials, 265*, 166–176. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.11.059

Shin, H., Yu, J., Wang, L., Jeong, Y., & Kim, J. (2020). Spectral interference of heavy metal contamination on spectral signals of moisture content for heavy metal contaminated soils. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 58*(4), 2266–2275. https://doi.org/10.1109/TGRS.2019.2946297

Siegel, F. R. (2002). *Environmental geochemistry of potentially toxic metals*. Springer.

Sobrino, J. A., Raissouni, N., Dempere, L., Kerr, Y., Olioso, A., López-García, M. J., Belaid, A., El Kharraz, M. H., & Cuenca, J. (2001). In Sobrino J. A. (Ed.), *Teledetección*. Servicio de Publicaciones, Universidad de Valencia.

Soca-Muñoz, J., Rodriguez-Machado, E., Aday-Diaz, O., Hernandez-Santana, L., & Orozco-Morales, R. (2020). Spectral signature of brown rust and orange rust in sugarcane. *Revista Facultad De Ingenieria-Universidad De Antioquia,* (96), 9–20. https://doi.org/10.17533/udea.redin.20191042

Song, L., Jian, J., Tan, D., Xie, H., Luo, Z., & Gao, B. (2015). Estimate of heavy metals in soil and streams using combined geochemistry and field spectroscopy in wan-sheng mining area, chongqing, china. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 34*, 1–9. https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.06.013

Sorahan, T., & Lancashire, R. J. (1997). Lung cancer mortality in a cohort of workers employed at a cadmium recovery plant in the united states: An analysis with detailed job histories. *Occupational and Environmental Medicine, 54*(3), 194–201. https://doi.org/10.1136/oem.54.3.194

Specim. (2024). *Hyperspectral imaging applications.* Specim. Retrieved 2024, from https://www.specim.com/hyperspectral-imaging-applications/

Suárez, S., Molina, E., Maldonado, G., Cuellar, L., & Romero, M. (2014). Mortalidad potencialmente relacionada con la explotación minero metalúrgica del níquel. *Higiene Y Sanidad Ambiental, 14*(4), 1235–1240. https://saludpublica.ugr.es/sites/dpto/spublica/public/inline-files/bc5496722283701_Hig.Sanid_.Ambient.14.(4).1235-1240.(2014).pdf

Sun, W., Zhang, X., Zou, B., & Wu, T. (2017). Exploring the potential of spectral classification in estimation of soil contaminant elements. *Remote Sensing, 9*(6), 632. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2017.01.013

Syndicat du Chocolat. (2019). *Chiffres clés 2018 des industres de la chocolaterie.* Syndicat du chocolat. Retrieved Nov 4, 2020, from https://www.chocolatiers.fr/wp-content/uploads/chiffre-cles-19-1.pdf

Tchounwou, P. B., Yedjou, C. G., Patlolla, A. K., & Sutton, D. J. (2012). Heavy metal toxicity and the environment. *Molecular, Clinical and Environmental Toxicology, 3*, 133–164. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8340-4_6

Thermo Fisher. (2021). iCAP PRO series ICP-OES software manual [computer software]. Bremen, Alemania:

Trenberth, K. E. (2020). Understanding climate change through earth's energy flows. *Journal of the Royal Society of New Zealand, 50*(2), 331–347. https://doi.org/10.1080/03036758.2020.1741404

USGS. (2017). *Spectral library version 7.* Retrieved 2024, from https://crustal.usgs.gov/speclab/QueryAll07a.php

USGS. (2024). *Minerals yearbook - metals and minerals.* https://www.usgs.gov. Retrieved 2024, from https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/minerals-yearbook-metals-and-minerals

Villaamil, C. (2015). Hidroarsenicismo crónico regional endémico en argentina. *Acta Bioquímica Clínica Latinoamericana, 49*(1), 00. https://www.scielo.org.ar/pdf/abcl/v49n1/v49n1a10.pdf

Waalkes, M. P., & Rehm, S. (1994). Cadmium and prostate-cancer. *Journal of Toxicology and Environmental Health, 43*(3), 251–269. https://doi.org/10.1080/15287399409531920

Wang, F., Gao, J., & Zha, Y. (2018). Hyperspectral sensing of heavy metals in soil and vegetation: Feasibility and challenges. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 136*, 73–84. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.12.003

Wang, P., XN, L., & Fang, H. (2010). Retrieval model for subtle variation of contamination stressed maize chlorophyll using hyperspectral data. *Guang Pu Xue Yu Guang Pu Fen Xi= Guang Pu, 30*(1), 197–201.

Winckell, A., Zebrowski, C., & Sourdat, M. (1997). *Las regiones y paisajes del ecuador*

Wu, Y. Z., Chen, J., Ji, J. F., Tian, Q. J., & Wu, X. M. (2005). Feasibility of reflectance spectroscopy for the assessment of soil mercury contamination. *Environmental Science & Technology, 39*(3), 873–878. https://doi.org/10.1021/es0492642

Yao, X., Zhu, Y., Tian, Y., Feng, W., & Cao, W. (2010). Exploring hyperspectral bands and estimation indices for leaf nitrogen accumulation in wheat. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 12*(2), 89–100. https://doi.org/10.1016/j.jag.2009.11.008

Zhang, X., Wen, J., & Zhao, D. (2010). Band selection method for retrieving soil lead content with hyperspectral remote sensing data. Paper presented at the *Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications, , 7831* 377–383. https://doi.org/https://doi.org/10.1117/12.864425

ANEXOS

"La perseverancia es la base de todas las acciones"

(Lao Tzu)

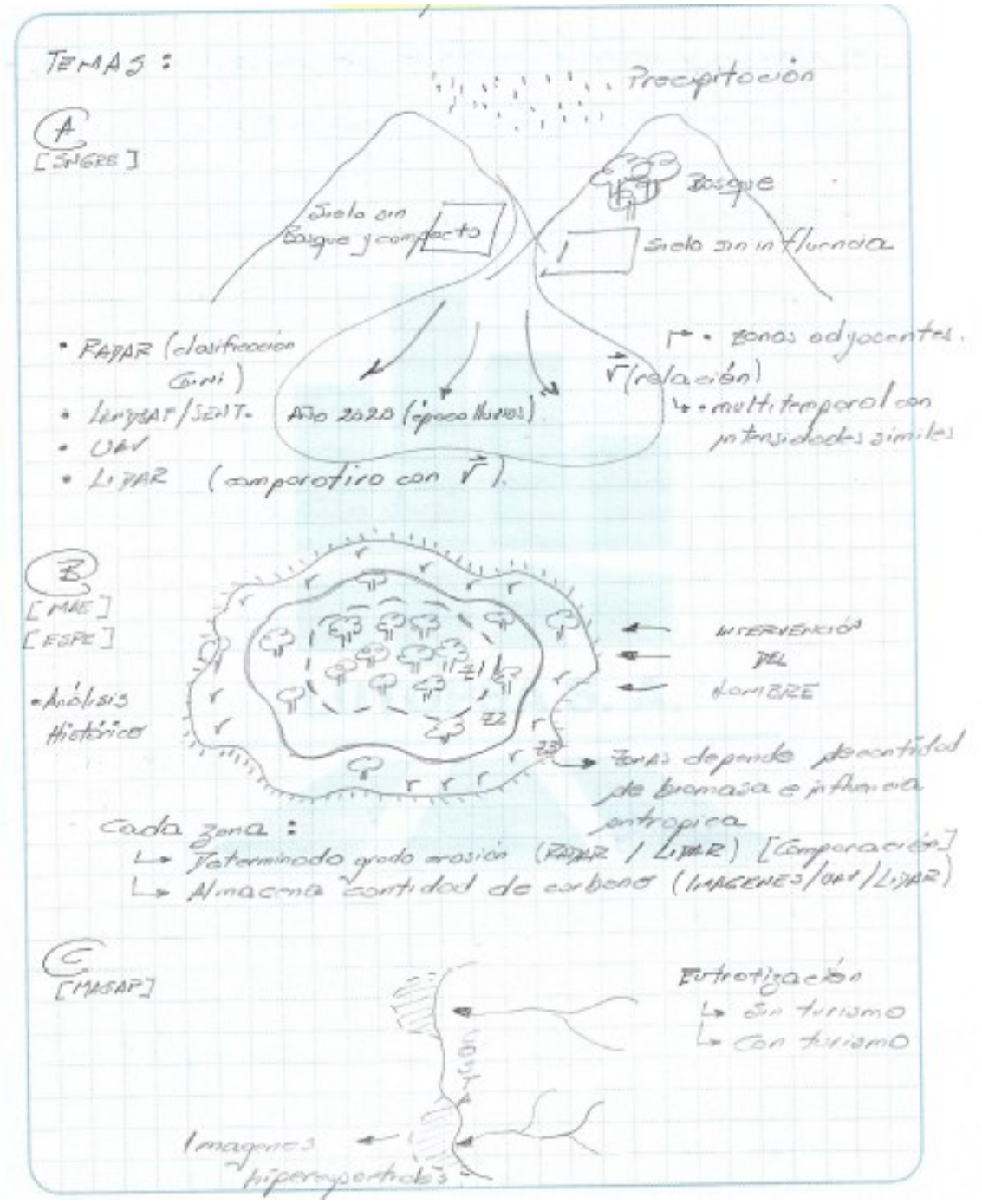
A. Estudio de temáticas previo a la definición de la línea de investigación

En un inicio se realizó un análisis de los posibles temas de investigación, en base a los problemas que se suscitan en Ecuador:

a. Movimiento en masa

b. Cambio de uso y cobertura

c. Contaminación ambiental en la Costa

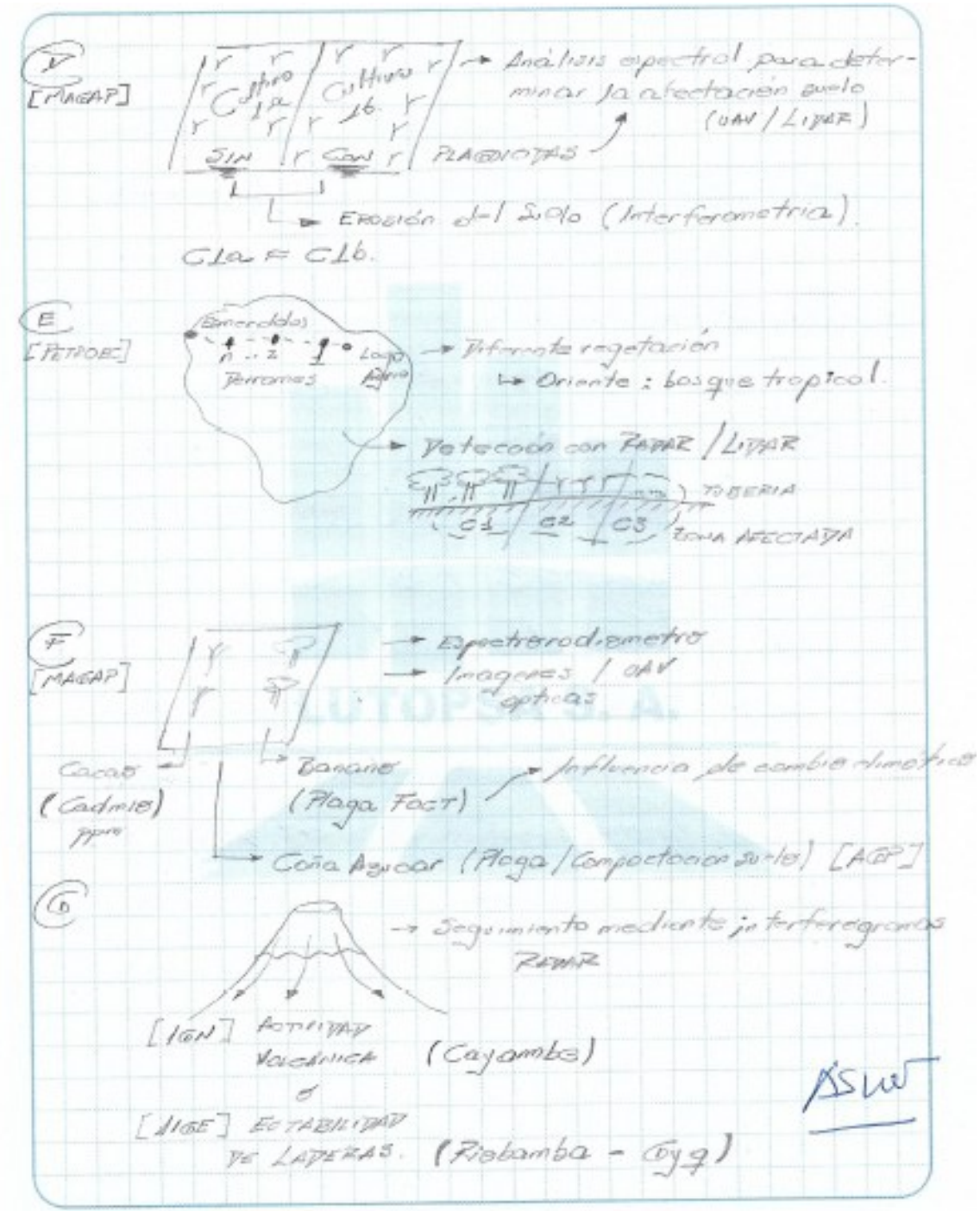


d. Erosión de suelo

e. Derrames de petróleo en continente

f. Afectación de cultivos por metales pesados

g. Actividad volcánica



B. Teledetección

1. Principios científicos de teledetección

La teledetección es la técnica de obtener información de cualquier objeto mediante el empleo de imágenes adquiridas por sensores, utilizando radiación electromagnética en una o varias regiones del espectro (Campbell & Wynne, 2011); esta información puede ser adquirida mediante las siguientes formas: reflexión (objeto de estudio), emisión y emisión – reflexión (Figura 1).

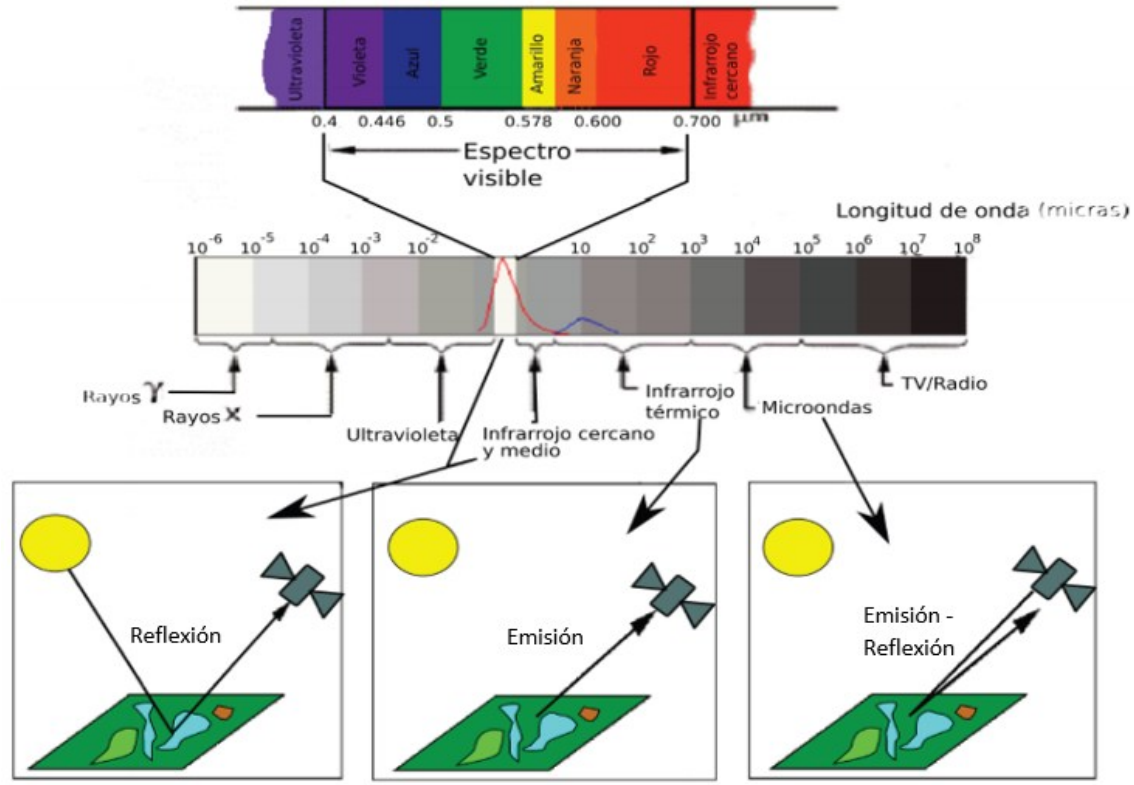


Figura 1: Espectro electromagnético y formas de teledetección.

Fuente: Adaptado de Ramírez (2015).

Este vocablo nace en los años 60, aplicado únicamente a la fotografía aérea (principal sensor en esa época), con el pasar de los años, la barrera entre teledetección aérea y espacial se ha desvanecido, debido al desarrollo tecnológico evolutivo orientado a la mejora de sus resoluciones. Actualmente, existen numerosos centros, a nivel mundial, enfocados a la producción, enseñanza e investigación dentro de este campo (Chuvieco, 2010).

La radiación es una de las formas de transmisión de energía, la cual permite su propagación de un punto a otro en forma de ondas, siguiendo un modelo armónico y continuo, siendo este el sustento de los sistemas de teledetección. Dicha energía se encuentra caracterizada por los campos ortogonales entre sí, denominados eléctrico y magnético, y puede ser descrita mediante la longitud de onda y frecuencia (Chuvieco, 2010).

Una de las magnitudes físicas absolutas más cercanas a la observación remota y relacionadas al flujo energético en el dominio solar del espectro, es la radiancia espectral (L_λ), la cual indica el total de energía radiada en una determinada longitud de onda por unidad de área y ángulo sólido. Sin embargo, existen magnitudes relativas (adimensionales) de suma importancia, las cuales analizan la interacción entre el objeto y la radiación solar incidente o flujo incidente (ϕ_i), el cual puede descomponerse en: reflectividad (ρ_λ), absortividad (α_λ), y transmisividad (τ_λ); su interacción se expresa en la Ecuación 1 (Chuvieco, 2010).

Ecuación 1

$$1 = \rho_\lambda + \alpha_\lambda + \tau_\lambda$$

Como se puede evidenciar, cada uno de los términos mencionados son dependientes de la longitud de onda, por ende, se ha considerado importante indicar aquellas regiones espectrales que han sido empleadas en la presente investigación, tomando como referencia a Campbell & Wynne (2011); Chuvieco (2010); Sobrino et al. (2001):

- Región del visible (0,4 a 0,7 μm), los límites se encuentran definidos por la sensibilidad del sistema visual humano, y su descomposición da como resultado tres segmentos, los cuales conocemos hoy en día como colores primarios. Esta porción del espectro coincide con las longitudes de onda en donde es máxima la radiación solar.
- Región del infrarrojo cercano (0,7 a 1,2 μm), presenta un comportamiento análogo a los sistemas ópticos, razón por la que, se le denomina también como infrarrojo fotográfico, ya que parte de su energía puede ser capturada por películas dotadas de emulsiones. Es de especial importancia por su capacidad para discriminar masas vegetales.
- Región del infrarrojo de onda corta (1,2 a 2,5 μm), región idónea para estimar el contenido de humedad en suelos y vegetación.

Otro aspecto que se debe tener en cuenta es que, la radiación empleada por la detección remota debe atravesar la atmósfera y dependiendo de la altitud a la que se encuentren los sensores, va a influir en mayor o menor medida. Por ende, la teledetección requiere el conocimiento de las interacciones de la energía electromagnética con la atmósfera. Dicha energía se verá modificada debido a procesos físicos, como: dispersión (redirección de la radiación), absorción (la atmósfera impide o atenúa la transmisión de la radiación) y refracción (desviación de los rayos de luz) (Campbell & Wynne, 2011). En la Figura 2 se evidencian dichos procesos que ocurren a partir del flujo energético Sol - Tierra.

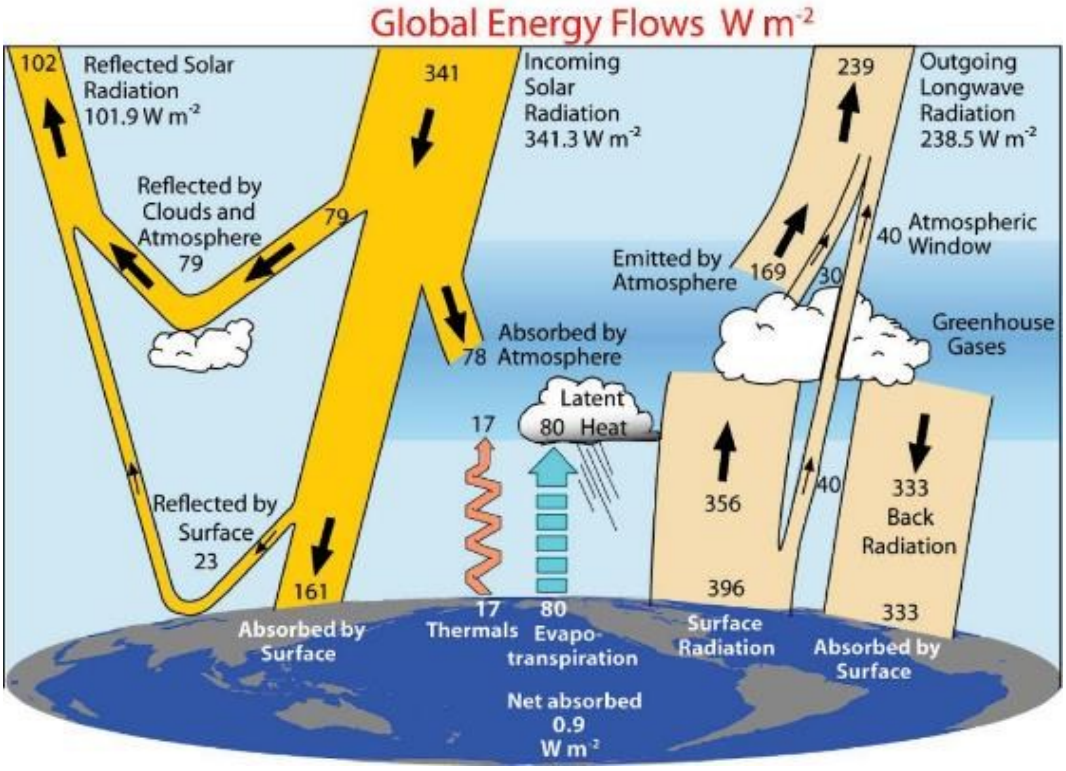


Figura 2: Principales procesos energéticos derivados del flujo de radiación solar.
Fuente: Tomado de Trenberth (2020).

Cabe indicar que, la atmósfera, mediante sus diferentes compuestos químicos que la integran, se comporta como un filtro selectivo a distintas bandas del espectro electromagnético, eliminando la posibilidad de observación remota de objetos en la superficie terrestre y generando lo que se conoce como ventanas atmosféricas (Figura 3), en donde la transmisividad de la atmósfera es alta (Chuvieco, 2010).

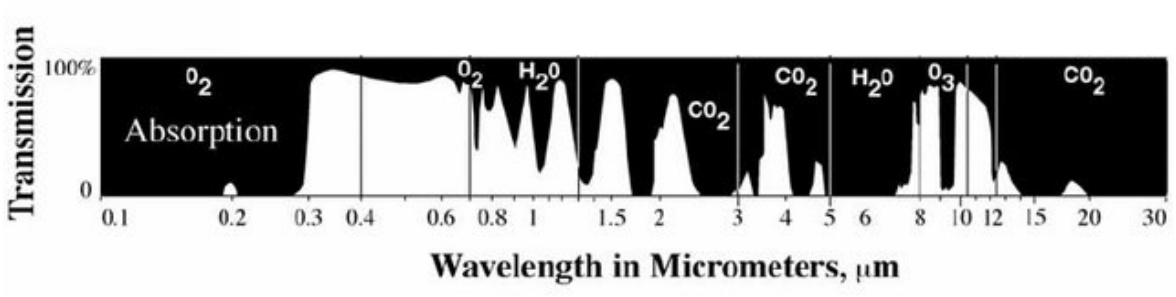


Figura 3: Ventanas atmosféricas en distintas longitudes de onda.
Fuente: Adaptado de Alavipanah et al. (2010).

Existen varios estudios, por ejemplo: Araque & Jiménez (2009); Chávez et al. (2009); Sá et al. (1999), entre otros, donde concluyen que la teledetección es eficaz para poder detectar y prevenir problemas fitosanitarios en la vegetación, mediante el estudio del comportamiento espectral. Sin embargo, existen estudios que mencionan que la información satelital presenta un aporte limitado, por ejemplo, Holmgren & Thuresson (1998) realizaron un análisis de teledetección para planificación forestal en regiones templadas y boreales, donde las principales barreras que se encontraron son la pobre resolución espacial y la disponibilidad de imágenes, siendo hoy en día, inconvenientes totalmente abordables, debido al acelerado desarrollo tecnológico.

2. Sensores

Los sensores se pueden clasificar de varias formas, una de las más habituales se sustenta en la fuente de energía, teniendo dos tipos de sensores: 1) pasivos: detectan la energía reflejada y emitida por los objetos, y 2) activos: emiten su propia energía y miden la radiación reflejada por el objeto. Otra forma de clasificar a los sensores, es en función del tipo de energía detectada, teniendo: 1) ópticos: caracterizados por detectar energía en el ultravioleta, visible e infrarrojo, 2) térmicos: detectan la radiación infrarrojo emitida por los objetos, y 3) microondas: miden la intensidad y polarización de las ondas centimétricas (Sobrino et al., 2001).

A continuación, se describirán términos relacionados a los sensores óptico-electrónicos de carácter pasivo, debido a que la presente investigación se centra en el uso de los mismos. Se ha tomado como referencia a: Campbell & Wynne (2011); Chuvieco (2010); Sobrino et al. (2001), sobre todo para tratar la parte espacial.

2.1. Imágenes

Uno de los sistemas utilizados tradicionalmente es la cámara analógica, la cual utiliza una película fotográfica para capturar información, hoy en día y de manera paulatina, estos sistemas han sido reemplazados por cámaras digitales, los cuales utilizan sensores electrónicos que convierten la luz en señales eléctricas, mediante el uso de prismas y filtros, y posteriormente, dichas señales son almacenadas como cuentas digitales y pueden ser visualizadas inmediatamente.

El modo de adquisición de información por parte de los sensores óptico-electrónicos es mediante exploradores o radiómetros de barrido, los cuales utilizan un espejo oscilante que se mueve de un lado a otro, de forma perpendicular a la dirección del movimiento de la plataforma, y, por otro lado, se tiene a los exploradores o radiómetros de empuje, los cuales utilizan una serie de detectores alineados de forma paralela al movimiento de la plataforma.

Dichos sensores son diseñados en función de una necesidad específica, por ejemplo: monitoreo climático, detección de cambios en vegetación, análisis de crecimiento urbano, apoyo en temas relacionados a seguridad, entre otros. A partir de estos objetivos, se definen las características orbitales que debe tener la plataforma, las cualidades per se del sensor, el nivel de procesamiento de la información, etc. Por lo tanto, en el presente apartado se abordarán estos temas, enfocados en el contexto de la investigación realizada.

a. Cualidades de los sensores

La capacidad que tiene un sensor para detectar o medir detalles particulares en la información obtenida, depende de varios tipos de resoluciones (Figura 4), las cuales se mencionan a continuación:

- Resolución espacial

  Se refiere al objeto más pequeño que puede ser distinguido en una imagen, siendo su unidad de medida característica el píxel, el cual proviene de la sección angular que observa el sensor en un momento determinado, denominado también como campo de visión instantáneo, y de la altura del sensor.

  Esta resolución tiene un papel importante en la interpretación y definición del nivel de detalle que se puede conseguir en una imagen, dicho de otra forma, se encuentra estrechamente ligada con la escala de trabajo. Además, en función

de su mejor resolución espacial, los sensores se clasifican en alta (< 10 m), media (10 m a 100 m) y baja resolución (> 100 m).

- Resolución espectral

Este tipo de resolución indica el número y la anchura de las bandas espectrales en que un sensor registra la radiación. Es preferible contar con bandas lo suficientemente estrechas con la finalidad de capturar información sobre regiones coherentes del espectro.

A continuación, se presenta una clasificación de este tipo de resolución: pancromático (1 banda), multiespectral (< 10 bandas), super espectral (de 10 a 30 bandas), e hiperespectral (> 100 bandas). Imágenes con las últimas características mencionadas han crecido notablemente dentro del mercado.

- Resolución radiométrica

Hace referencia a la sensibilidad de un sensor para detectar variaciones en la radiancia espectral que recibe, y se identifica con el rango posible de valores que un sensor puede almacenar. Se encuentra expresada en bits, por ejemplo, si una imagen tiene 8 bits de resolución radiométrica, esto quiere decir que puede distinguir 256 niveles de intensidad ($2^8 = 256$).

Según varios autores, la capacidad de nuestros ojos para discriminar niveles de grises, no excede de 64 tonalidades, sin embargo, gracias a la ayuda de los ordenadores, la intención es aprovechar todo el rango de niveles de codificación disponibles al momento de realizar un análisis digital.

- Resolución temporal

Este tipo de resolución alude a la frecuencia de cobertura que proporciona el sensor, esto quiere decir, la periodicidad con la que adquiere imágenes de una misma porción de la superficie terrestre. El ciclo de cobertura está en función de las características orbitales y del diseño per se del sensor.

Es de amplia utilidad sobre todo para aplicaciones relacionadas con detección de cambios debido a desastres naturales, monitoreo agrícola, análisis de la dinámica urbana, etc.

- Resolución angular

Se relaciona a la capacidad de un sensor para observar la misma zona desde diferentes ángulos. Es empleada para modelar efectos de reflectividad

bidireccional, estimación de variables atmosféricas, generación de modelos estereoscópicos, etc.

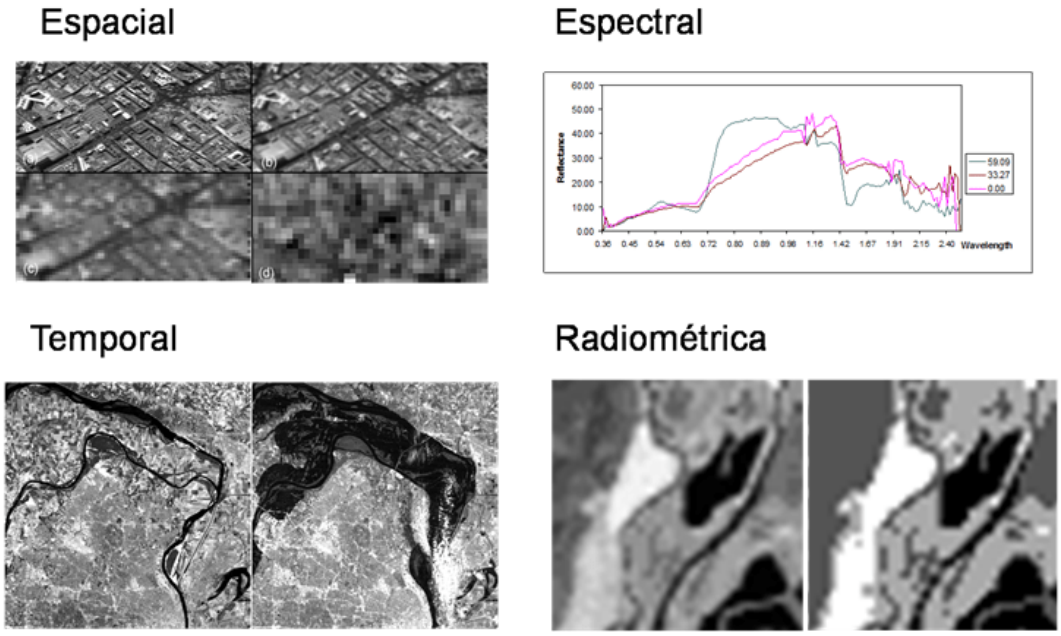


Figura 4: Tipos de resoluciones.
Fuente: Tomado de Ingeoexpert (2024).

b. Plataformas

En la actualidad, tanto las plataformas satelitales como las aerotransportadas (tripuladas y no tripuladas), juegan un papel crucial en la adquisición de información para una amplia gama de aplicaciones. A continuación, se realiza una descripción de ambas plataformas:

- Satélites

Los satélites son objetos artificiales situados en el espacio, los cuales orbitan alrededor de la Tierra, gracias al apoyo de un lanzador. Los tres elementos más importantes de una órbita espacial son: inclinación (ángulo definido por la inclinación del plano orbital y del plano ecuatorial terrestre), período de revolución (tiempo que tarda en dar una vuelta completa), y, altitud (distancia entre el satélite y la superficie de la Tierra).

Las órbitas más comunes empleadas para teledetección son las denominadas: geosíncrona y heliosíncrona, los satélites ubicados en la primera de estas, se desplazan según una órbita ecuatorial a 36.000 km de distancia, y es

ampliamente utilizado en observación meteorológica y telecomunicaciones. La segunda órbita mencionada, presenta una inclinación de casi 90º, manteniéndose fijo en relación al plano orbital de la Tierra alrededor del Sol, su altitud varía entre 160 a 2.000 km, siendo la órbita más habitual en los satélites de recursos naturales.

En la Figura 5 se presenta una línea evolutiva de aquellas misiones espaciales de mayor relevancia en los estudios de teledetección:

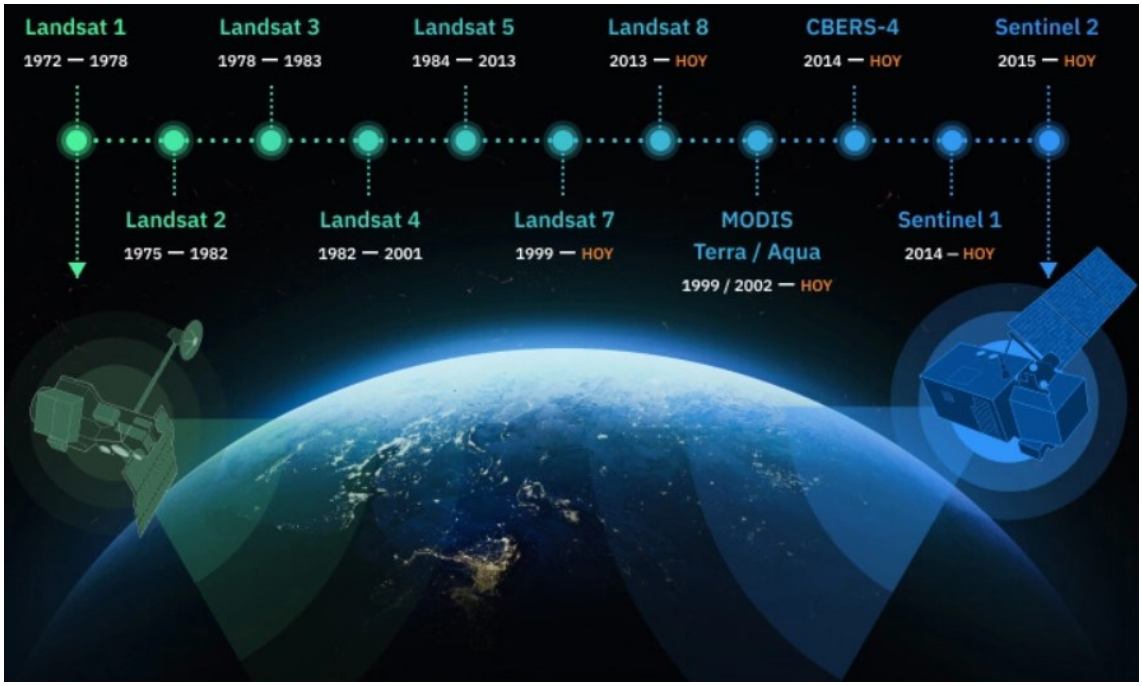


Figura 5: Línea evolutiva de misiones espaciales.
Fuente: Tomado de Sergieieva (2022).

El programa Landsat, ha tenido diferentes misiones desde el año 1972, lo que representa el registro más largo de información de la superficie terrestre. Actualmente, se encuentra a cargo de la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA, por sus siglas en inglés) y del USGS, y tiene operativos a los satélites Landsat 8 y 9, de características orbitales similares (altitud: ≈ 705 km e inclinación: 98,2º) y resoluciones análogas (espacial: 15, 30 y 100 m, espectral: 11 bandas, temporal: 16 días y radiométrica: 12 bits). Prevé en el 2030 realizar el lanzamiento de la misión Landsat Next, el cual presenta una mejora en sus resoluciones espacial y espectral.

Por otro lado, se tiene el programa Copernicus de la ESA, el cual contempla una serie de misiones especializadas en un tipo de monitoreo, para el presente estudio es de interés mencionar a Sentinel-2, el cual se encuentra operativo desde el 2015 hasta la actualidad, presentando las siguientes características orbitales y resoluciones: altitud: ≈ 786 km, inclinación: 98,6º, espacial: ≈ 10, 20 y 60 m, espectral: 13 bandas, temporal: 5 días (por sus dos satélites: 2ª y 2B) y radiométrica: 12 bits. Sus aplicaciones se encaminan mayoritariamente a monitoreo ambiental y de seguridad (ESA, 2015).

Otra de las misiones que presentan una alta resolución espacial y una buena resolución espectral es el caso de la misión WorldView-3, operada por la empresa Maxar, se encuentra operativa desde el año 2014, y permite identificar detalles precisos de la superficie terrestre. Presenta las siguientes características orbitales y resoluciones: altitud: ≈ 617 km, inclinación: 98º, espacial: ≈ 0,31, 1,24 y 3,7 m, espectral: 28 bandas, temporal: 1 día (alta maniobrabilidad y redirección) y radiométrica: 11 bits.

Una de las misiones hiperespectrales es la denominada PRISMA, propiedad de la ASI, puesta en órbita desde el año 2019, empleada en investigaciones agroforestales, geológicas, etc., presentando una amplia ventaja respecto a los sensores multiespectrales. Sus características orbitales y resoluciones son: altitud: ≈ 615 km, inclinación: 97,9º, espacial: ≈ 5 y 30 m, espectral: 239 bandas, temporal: 7 días (áreas específicas) y radiométrica: 12 bits.

Las dos primeras misiones mencionadas son de acceso libre y presentan características y aplicaciones similares, y las dos subsiguientes son de tipo comercial, sin embargo, dentro del mercado existe un sinfín de misiones (libres y comerciales) adicionales, por ejemplo, satélites para monitoreo de recursos naturales: SPOT, ASTER, IRS, etc., satélites meteorológicos: Terra, Aqua, Meteosat, etc., satélites de muy alta resolución espacial: Ikonos, Quickbird, Pléiades, Geosat, etc.; satélites de alta resolución espectral: Enmap, Resurs, y, algunas misiones previstas en el futuro, como es el caso de Sentinel-CHIME. Todo el material relacionado a misiones extintas, actuales y futuras se encuentran en el catálogo de la ESA (2024b).

- Aerotransportadas

El uso de estas plataformas se remonta al año 1909, cuando Wilbur Wright captura la primera fotografía aérea desde un avión, cerca de la ciudad de Roma, Italia, sin embargo, no es sino hasta la década de los 50, donde comienza el desarrollo de los primeros sensores óptico-electrónicos, y a partir del 2010, se empezaron a popularizar el uso de drones en aplicaciones civiles.

Existen varios sensores que pueden ser montados en plataformas aéreas tripuladas (HIRIS, AVIRIS, Hymap, etc.) y en vehículos aéreos no tripulados (Parrot Sequoia, Specim, etc.). Constantemente los avances tecnológicos han permitido mejorar en la precisión, resolución y capacidad de captación de datos, y, como se indicó previamente, una de las ventajas que poseen estas plataformas, es la insignificante afectación ocasionada por la atmósfera.

En la actualidad, la cámara multiespectral Parrot Sequoia+, ha sido ampliamente usada en temas de agricultura de precisión; posee 4 bandas espectrales (Figura 6): verde (550 nm), rojo (660 nm), borde rojo (735 nm), e infrarrojo cercano (790 nm), diseñadas con un ancho de banda de 40 nm, a excepción de borde rojo de 10 nm (senseFly Parrot Group, 2018).

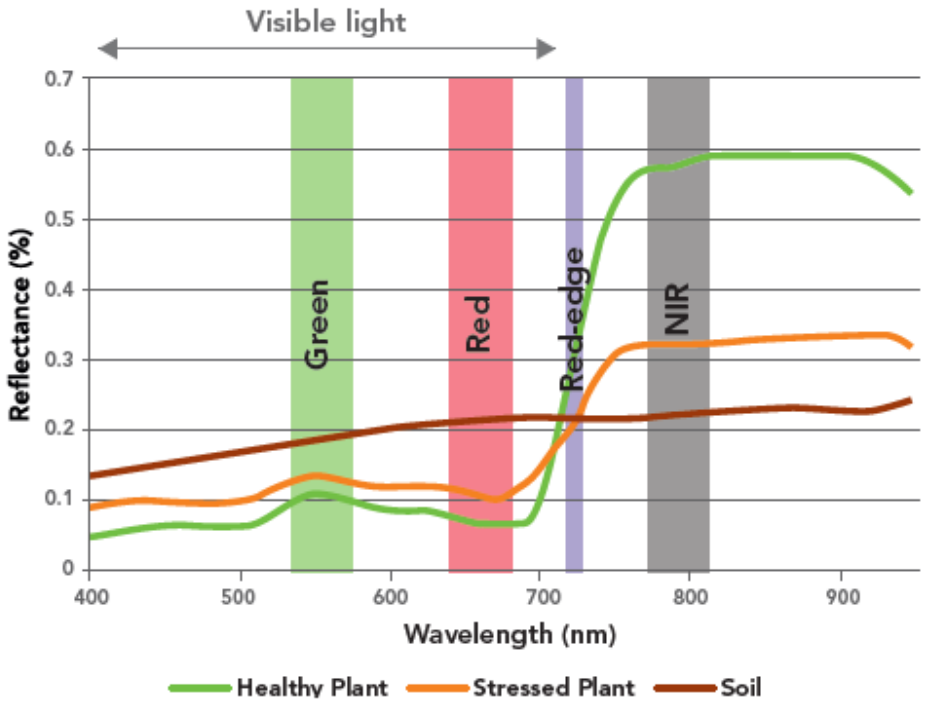


Figura 6: Bandas de cámara multiespectral Parrot Sequoia+ y firmas espectrales.

Fuente: Tomado de Parrot Drones (2016).

Los sensores hiperespectrales Specim (FX10, FX17 y FX50), propiedad de la empresa Konica, han comenzado a introducirse en el mercado, ofreciendo una notable ventaja gracias a su alta resolución espacial, espectral, así como a su capacidad de acoplamiento a vehículos aéreos no tripulados (Specim, 2024).

En resumen, las imágenes satelitales ofrecen una amplia cobertura geográfica, permitiendo la monitorización de cambios a gran escala. En cambio, las imágenes aerotransportadas, brindan alta resolución y flexibilidad. Ambas tecnologías son complementarias, y maximizan la eficiencia en el análisis de datos.

c. Nivel de procesamiento de imágenes

Independiente del nivel de procesamiento que posean los datos de partida, es fundamental conocer las correcciones que se realizan a las imágenes con la finalidad de eliminar anomalías existentes; estas son:

- Corrección geométrica

En este proceso se asigna a cada píxel su respectiva coordenada geográfica, propendiendo a erradicar distorsiones ocasionadas por la rotación de la Tierra, oscilaciones de la plataforma, tiempo de barrido, distorsión panorámica y curvatura de la Tierra; para esto se puede emplear la técnica clásica de puntos de control (GCP, por sus siglas en inglés), los cuales pueden ser obtenidos en campo o a partir de imágenes ya georreferenciadas.

- Corrección radiométrica

La energía reflejada o emitida por los diferentes objetos y capturada por el sensor, es posteriormente codificada a cuentas digitales, mediante el uso de coeficientes de calibración. En función de esto, se debe aplicar el proceso inverso, para la derivación de magnitudes físicas, en este caso puntual, para la extracción de la radiancia (W m^{-2} sr^{-1} μm^{-1}). Esto se lleva a cabo mediante la operación indicada en la Ecuación 2:

Ecuación 2

$$L_{\lambda,k} = \left(a_{0,k} \times ND_k\right) + a_{1,k}$$

Donde $L_{\lambda,k}$ es la radiancia espectral recibida por el sensor en la banda k, ND_k son las cuentas digitales en la misma banda, y las variables $a_{0,k}$ y $a_{1,k}$ son los coeficientes de calibración para cada banda, los cuales pueden ser extraídos de los metadatos de la imagen.

- Cálculo de reflectividades

La relación existente entre la energía reflejada por cualquier objeto y la energía incidente da origen a esta variable relativa denominada reflectividad (ρ_λ). Su determinación (Ecuación 3) se encuentra en función de los parámetros: irradiancia solar extraterrestre integrada para la banda del sensor ($E_{o,k}$), ángulo cenital solar (θ_i) y factor corrector de la distancia Tierra-Sol (D).

Ecuación 3

$$\rho_{TOA,k} = \frac{D\pi\, L_{sen,k}}{E_{o,k}\, \cos\theta_i}$$

Donde $\rho_{TOA,k}$ es la reflectividad en el techo de la atmósfera (TOA, por sus siglas en inglés) para una determinada banda espectral, la cual no toma en cuenta las perturbaciones atmosféricas.

La atmósfera interpuesta entre la superficie y el sensor altera la señal electromagnética, haciendo que en el espectro visible e infrarrojo cercano domine la dispersión de energía, por lo que es necesario disminuir al máximo este efecto; esto puede ser llevado a cabo mediante: radio-sondeos, utilización de bandas espectrales que permitan estimar el estado de la atmósfera, modelos de transferencia radiativa que permitan simular la atmósfera (MODTRAN, ATCOR, etc.), o a partir de la propia imagen.

La radiancia medida por el sensor ($L_{\lambda,k}$) se encuentra compuesta por la radiancia reflejada por la superficie per se ($L_{su,k}$), la radiancia dispersada por la atmósfera, la cual llega a la superficie terrestre ($L_{sd,k}$), y la radiancia de camino, la cual nunca llega a la superficie ($L_{sp,k}$), como se evidencia en la Ecuación 4:

Ecuación 4

$$L_{\lambda,k} = L_{su,k} + L_{sd,k} + L_{sp,k}$$

A partir de esto, se puede obtener la reflectividad de la superficie (Ecuación 5) para cada banda k ($\rho_{sup,k}$ o $\rho_{BOA,k}$), misma que estará en función de las variables: transmisividad atmosférica en dirección de visión del sensor ($\tau_{v,k}$), transmisividad atmosférica en la dirección de la iluminación solar ($\tau_{s,k}$), y la irradiancia difusa ($E_{d,k}$).

Ecuación 5

$$\rho_{sup,k} = \frac{D\pi \left(\frac{L_{\lambda,k} - L_{sp,k}}{\tau_{v,k}}\right)}{\left(E_{o,k} \cos\theta_i \ \tau_{s,k}\right) + E_{d,k}}$$

Los términos de transmisividades, la irradiancia difusa y la radiancia de camino son derivadas a partir del modelo de transferencia radiativa.

Algunas misiones, como es el caso de Landsat 8 y 9, Sentinel-2, entre otros, ponen a disposición en sus diferentes *hub* de datos, imágenes con distintos niveles de procesamiento, de manera general, el nivel cero (L0) corresponde a datos en bruto sin procesamiento alguno, el nivel uno (L1) son imágenes con corrección geométrica y radiométrica TOA, el nivel dos (L2) son imágenes que poseen valores escalados de reflectividad BOA, y el nivel tres (L3) se refiere a productos derivados, por ejemplo: índices espectrales, mosaicos, entre otros (ESA, 2024d).

2.2. Espectrorradiómetros

Representan una nueva generación de instrumentos concebidos para medir la radiación incidente sobre una superficie o para caracterizar la radiación emitida por una fuente. Consta fundamentalmente de: 1) sistema óptico de entrada, 2) monocromador para separar las diferentes bandas espectrales de la energía que se requiera medir, 3) sistema de detección que recoge la energía radiante (un único detector o una matriz de detectores), y 4) procesado de la señal (Figura 7) (Centro Español de Metrología, 2009).

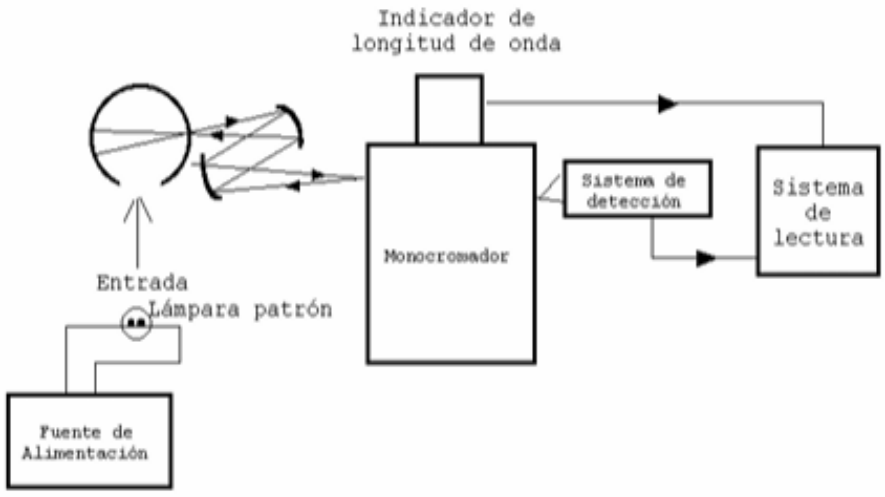


Figura 7: Configuración típica de un espectrorradiómetro.

Fuente: Tomado de Centro Español de Metrología (2009).

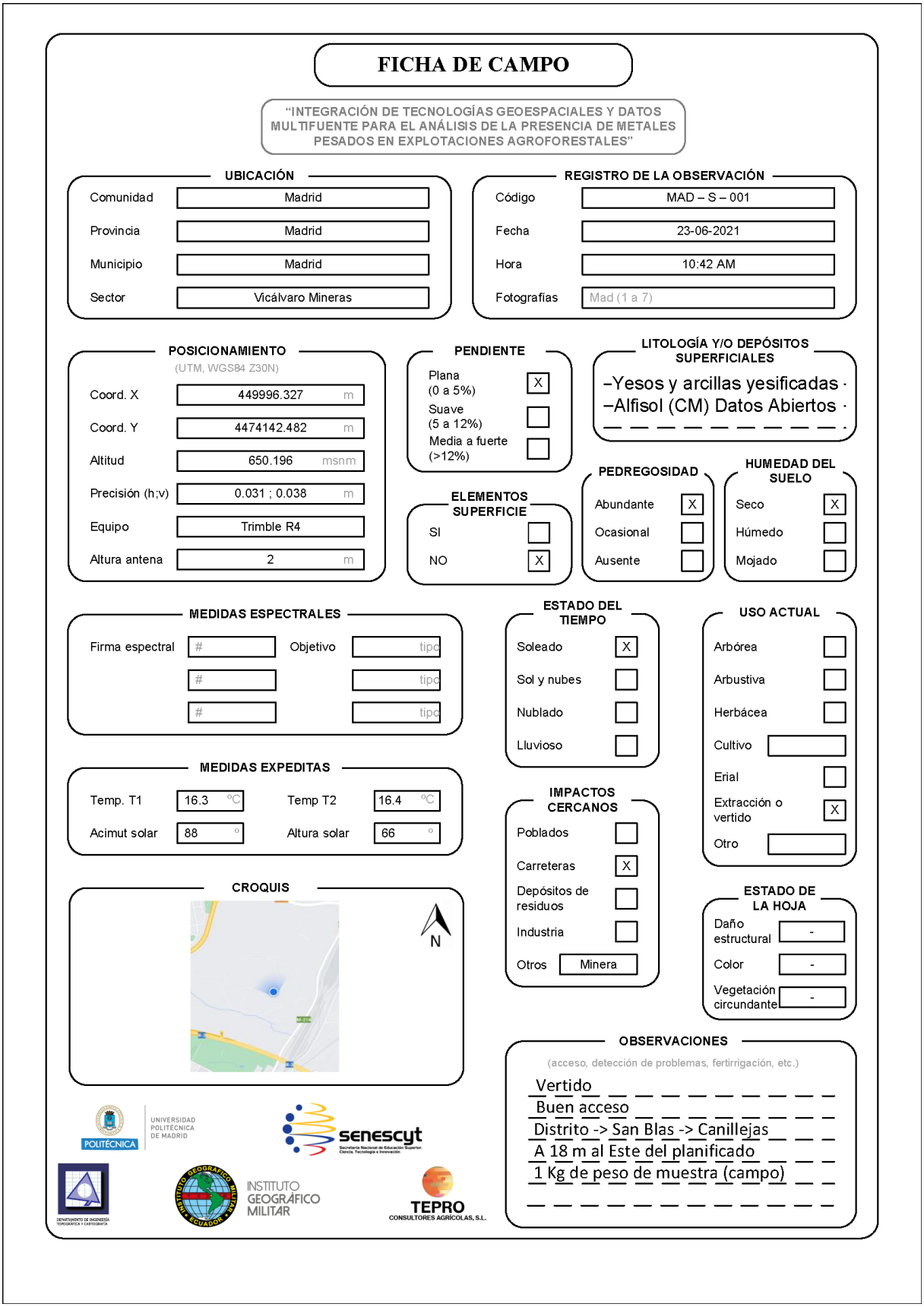
El uso de dicha tecnología comienza desde la década de 1970, y uno de los primeros modelos fue el Exotech 100 AXM + T (Figura 8a) diseñado por la empresa Exotech Inc., fue ampliamente utilizado por investigadores de la NASA y de la USGS, capturaba información en 4 bandas espectrales (azul, verde, rojo e infrarrojo cercano) y se componía de 2 radiómetros, uno para medir la energía incidente y otro para medir la energía reflejada, es considerado un precursor importante en la instrumentación portátil para la teledetección (Cabrera et al., 2012).

Posteriormente, desde los años 2000 se evidencia un crecimiento sustancial en el desarrollo tecnológico de estos instrumentos, es así como la empresa Malvern Panalytical, posee varios modelos ASD FieldSpec, siendo uno de los más importante la versión 4 (Figura 8b), el cual trabaja en longitudes de onda que van del ultravioleta al infrarrojo medio (350 a 2500 nm), con un ancho de banda entre 6 a 10 nm (Malvern Panalytical, 2024). Además, existen otras empresas dedicadas al desarrollo de esta tecnología, por ejemplo: Spectral Evolution (SR-6500), Bentham Instruments (PMA-12), entre otros.

Figura 8: Modelos de espectrorradiómetro: a) Exotech; b) ASD FieldSpec.
Fuente: Tomado de Cabrera et al. (2012); Malvern Panalytical (2024).

La gran mayoría de espectrorradiómetros actuales son contralados por software mediante la asistencia de un ordenador, diseñados por las propias casas comerciales, los cuales presentan las funciones de: recopilación de datos, aplicación de técnicas estadísticas y/o tratamiento posterior a las medidas efectuadas (Centro Español de Metrología, 2009).

C. Fichas de campaña de campo



FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Comunidad	Madrid
Provincia	Madrid
Municipio	Madrid
Sector	Vicálvaro Mineras

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	MAD – S – 001
Fecha	23-06-2021
Hora	10:42 AM
Fotografías	Mad (1 a 7)

POSICIONAMIENTO

(UTM, WGS84 Z30N)

Coord. X	449996.327	m
Coord. Y	4474142.482	m
Altitud	650.196	msnm
Precisión (h;v)	0.031 ; 0.038	m
Equipo	Trimble R4	
Altura antena	2	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	X
Suave (5 a 12%)	
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

–Yesos y arcillas yesificadas
–Alfisol (CM) Datos Abiertos

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	X
Ocasional	
Ausente	

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	X
Húmedo	
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	#	Objetivo	tipo
	#		tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	X
Sol y nubes	
Nublado	
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	
Cultivo	
Erial	
Extracción o vertido	X
Otro	

MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	16.3 °C	Temp T2	16.4 °C
Acimut solar	88 °	Altura solar	66 °

IMPACTOS CERCANOS

Poblados	
Carreteras	X
Depósitos de residuos	
Industria	
Otros	Minera

CROQUIS

ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	-
Color	-
Vegetación circundante	-

OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

Vertido
Buen acceso
Distrito -> San Blas -> Canillejas
A 18 m al Este del planificado
1 Kg de peso de muestra (campo)

POLITÉCNICA — UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID — senescyt — INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR — TEPRO CONSULTORES AGRÍCOLAS, S.L.

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Comunidad	Madrid
Provincia	Madrid
Municipio	San Fernando de Henores
Sector	Puerto de los Pinos

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	MAD – S – 002
Fecha	23-06-2021
Hora	11:35 AM
Fotografías	Mad (8 a 11)

POSICIONAMIENTO

(UTM, WGS84 Z30N)

Coord. X	455118.016	m
Coord. Y	4476912.582	m
Altitud	561.262	msnm
Precisión (h;v)	0.024 ; 0.026	m
Equipo	Trimble R4	
Altura antena	2	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	X
Suave (5 a 12%)	
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

Sedimentos dentríticos
(Datos abiertos CM)

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	X
Ocasional	
Ausente	

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	
Húmedo	X
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	#	Objetivo	tipo
	#		tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	
Sol y nubes	X
Nublado	
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	
Cultivo	
Erial	
Extracción o vertido	X
Otro	

MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	24.6 °C	Temp T2	25.2 °C
Acimut solar	94 °	Altura solar	75 °

IMPACTOS CERCANOS

Poblados	
Carreteras	X
Depósitos de residuos	X
Industria	
Otros	Minera

CROQUIS

ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	-
Color	-
Vegetación circundante	-

OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

Acceso restringido a la minera
A 9 metros al Sur del punto de planificado
Distrito -> 130-01
1.2 Kg de peso de muestra (campo)

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
senescyt
INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR
TEPRO CONSULTORES AGRÍCOLAS, S.L.

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Comunidad	Madrid
Provincia	Madrid
Municipio	San Fernando de Henores
Sector	Camino Carretas

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	MAD – S – 003
Fecha	23-06-2021
Hora	11:58 AM
Fotografías	Mad (12 a 16)

POSICIONAMIENTO

(UTM, WGS84 Z30N)

Coord. X	455752.352	m
Coord. Y	4476972.399	m
Altitud	559.678	msnm
Precisión (h;v)	0.024 ; 0.027	m
Equipo	Trimble R4	
Altura antena	2	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	X
Suave (5 a 12%)	
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

— Sedimentos dentríticos— · — — Alfisol / Inceptisol– — · — –(Datos Abiertos CM) — ·

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	X
Ausente	

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	
Húmedo	X
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	#	Objetivo	tipo
	#		tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	
Sol y nubes	X
Nublado	
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	
Cultivo	
Erial	
Extracción o vertido	X
Otro	

MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	30.1 °C	Temp T2	28 °C
Acimut solar	91 °	Altura solar	79 °

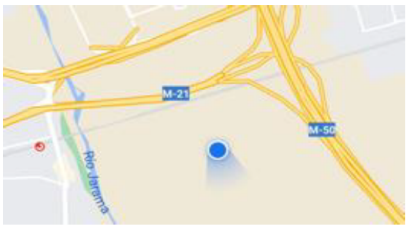
IMPACTOS CERCANOS

Poblados	
Carreteras	X
Depósitos de residuos	X
Industria	
Otros	Cables

ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	-
Color	-
Vegetación circundante	-

CROQUIS



OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

No es cultivo
A 29 metros al Norte del planificado
Alta influencia de tendido eléctrico
Distrito -> 130-01
1.65 Kg de peso de muestra (campo)

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID · senescyt · INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR · TEPRO CONSULTORES AGRÍCOLAS, S.L.

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Comunidad	Madrid
Provincia	Madrid
Municipio	Mejorada del Campo
Sector	Parque Regional Las Islillas

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	MAD – S – 005
Fecha	23-06-2021
Hora	13:31 PM
Fotografías	Mad (17 a 19)

POSICIONAMIENTO

(UTM, WGS84 Z30N)

Coord. X	458217.114	m
Coord. Y	4472670.865	m
Altitud	573.179	msnm
Precisión (h;v)	0.020 ; 0.026	m
Equipo	Trimble R4	
Altura antena	2	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	
Suave (5 a 12%)	
Media a fuerte (>12%)	X

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

— Sedimentos dentríticos— ·
— —Inceptisol / Entisol– — ·
— –(Datos Abiertos CM) — ·

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	X
Ausente	

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	X
Húmedo	
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	#	Objetivo	tipo
	#		tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	
Sol y nubes	X
Nublado	
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	
Cultivo	
Erial	X
Extracción o vertido	
Otro	

MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	38.9 °C	Temp T2	39.6 °C
Acimut solar	126 °	Altura solar	84 °

IMPACTOS CERCANOS

Poblados	X
Carreteras	
Depósitos de residuos	
Industria	
Otros	

CROQUIS

ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	-
Color	-
Vegetación circundante	-

OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

Acceso limitado en vehículo
Vegetación de tipo natural
A 81 metros al Suroeste del planificado
Distrito -> 084-01
1.3 Kg de peso de muestra (campo)

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
senescyt
INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR
TEPRO CONSULTORES AGRÍCOLAS, S.L.

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Comunidad	Madrid
Provincia	Madrid
Municipio	Rivas - Vaciamadrid
Sector	Ternera Vega de Rivas

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	MAD – S – 006
Fecha	23-06-2021
Hora	14:09 PM
Fotografías	Mad (20 a 30)

POSICIONAMIENTO

(UTM, WGS84 Z30N)

Coord. X	456698.030	m
Coord. Y	4470572.970	m
Altitud	547.107	msnm
Precisión (h;v)	0.020 ; 0.027	m
Equipo	Trimble R4	
Altura antena	2	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	X
Suave (5 a 12%)	
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

— Sedimentos dentríticos— ·
— Entisoles / Inceptisoles— ·
— –(Datos Abiertos CM) — ·

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	
Ausente	X

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	X
Húmedo	
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	#	Objetivo	tipo
	#		tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	
Sol y nubes	X
Nublado	
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	
Cultivo	Cereales
Erial	
Extracción o vertido	
Otro	

MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	31.6 °C	Temp T2	°C
Acimut solar	158 °	Altura solar	88 °

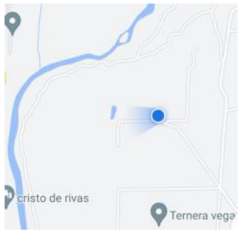
IMPACTOS CERCANOS

Poblados	
Carreteras	X
Depósitos de residuos	
Industria	
Otros	Cables

ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	-
Color	-
Vegetación circundante	-

CROQUIS



OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

Época de cosecha
Alta influencia de tendido eléctrico
Distrito -> 123-01
1.55 Kg de peso de muestra (campo)

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
senescyt
INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR
TEPRO CONSULTORES AGRÍCOLAS, S.L.

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Comunidad	Madrid
Provincia	Madrid
Municipio	Arganda del Rey
Sector	Tramsa

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	MAD – S – 008
Fecha	23-06-2021
Hora	16:02 PM
Fotografías	Mad (36 a 42)

POSICIONAMIENTO

(UTM, WGS84 Z30N)

Coord. X	460148.597	m
Coord. Y	4464966.900	m
Altitud	539.116	msnm
Precisión (h;v)	0.020 ; 0.027	m
Equipo	Trimble R4	
Altura antena	2	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	X
Suave (5 a 12%)	
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

— Sedimentos dendríticos— · — — — -Cantera — — — · — –(Datos Abiertos CM) — ·

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	X
Ausente	

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	X
Húmedo	
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	#	Objetivo	tipo
	#		tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	
Sol y nubes	X
Nublado	
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	
Cultivo	
Erial	
Extracción o vertido	X
Otro	

MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	30.9 °C	Temp T2	°C
Acimut solar	222 °	Altura solar	80 °

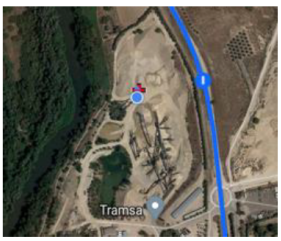
IMPACTOS CERCANOS

Poblados	
Carreteras	X
Depósitos de residuos	
Industria	
Otros	Minera

ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	-
Color	-
Vegetación circundante	-

CROQUIS



OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

Acceso restringido
A 28m al Sur del planificado
Distrito -> 014-01
1.3 Kg de peso de muestra

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Comunidad	Madrid
Provincia	Madrid
Municipio	Arganda del Rey
Sector	Laguna El Percal

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	MAD – S – 009
Fecha	23-06-2021
Hora	16:35 PM
Fotografías	Mad (43 a 46)

POSICIONAMIENTO (UTM, WGS84 Z30N)

Coord. X	456355.795	m
Coord. Y	4462648.461	m
Altitud	530.057	msnm
Precisión (h;v)	0.021 ; 0.026	m
Equipo	Trimble R4	
Altura antena	2	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	X
Suave (5 a 12%)	
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

— Sedimentos dendríticos— · — — — ·Inceptisol— — — · — –(Datos Abiertos CM) — ·

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	X
Ausente	

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	X
Húmedo	
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	#	Objetivo	tipo
	#		tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	
Sol y nubes	X
Nublado	
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	X
Herbácea	
Cultivo	
Erial	
Extracción o vertido	
Otro	

MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	36.9 °C	Temp T2	°C
Acimut solar	236 °	Altura solar	81 °

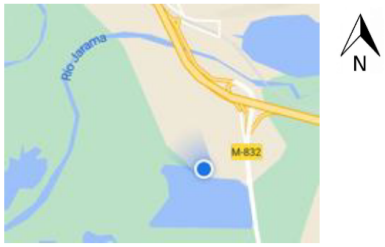
IMPACTOS CERCANOS

Poblados	X
Carreteras	X
Depósitos de residuos	
Industria	
Otros	

ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	-
Color	-
Vegetación circundante	-

CROQUIS



OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

Vegetación de tipo natural
A 155m al Norte del planificado
Distrito -> 014-01
Antiguamente parece haber sido zona de extracción
1.3 Kg de peso de muestra (campo)

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID · senescyt · INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR · TEPRO CONSULTORES AGRÍCOLAS, S.L.

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Comunidad	Madrid
Provincia	Madrid
Municipio	Rivas - Vaciamadrid
Sector	Granja de Santa Teresa

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	MAD – S – 010
Fecha	23-06-2021
Hora	17:06 PM
Fotografías	Mad (47 a 52)

POSICIONAMIENTO

(UTM, WGS84 Z30N)

Coord. X	456781.419	m
Coord. Y	4461998.553	m
Altitud	529.838	msnm
Precisión (h;v)	0.021 ; 0.026	m
Equipo	Trimble R4	
Altura antena	2	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	
Suave (5 a 12%)	X
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

— Sedimentos dendríticos— ·
— — — ·Inceptisol— — — ·
— –(Datos Abiertos CM) — ·

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	X
Ausente	

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	X
Húmedo	
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	#	Objetivo	tipo
	#		tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	
Sol y nubes	X
Nublado	
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	X
Herbácea	
Cultivo	
Erial	
Extracción o vertido	
Otro	

MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	38.8 °C	Temp T2	°C
Acimut solar	232 °	Altura solar	65 °

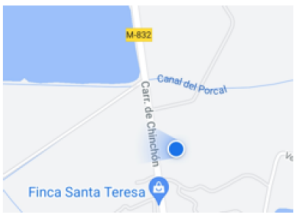
IMPACTOS CERCANOS

Poblados	X
Carreteras	X
Depósitos de residuos	
Industria	
Otros	Antenas

ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	-
Color	-
Vegetación circundante	-

CROQUIS



OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

Vegetación de tipo natural
Fauna y flora silvestre
A 118m al Sur del planificado
Distrito -> 014-01
1.2 Kg de peso de muestra (campo)

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID · senescyt · INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR · TEPRO CONSULTORES AGRÍCOLAS, S.L.

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Comunidad	Madrid
Provincia	Madrid
Municipio	Arganda del Rey
Sector	Polígono EASA

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	MAD – C – 012
Fecha	23-06-2021
Hora	17:53 PM
Fotografías	Mad (53 a 58)

POSICIONAMIENTO

(UTM, WGS84 Z30N)

Coord. X	458209.643	m
Coord. Y	4461069.199	m
Altitud	545.801	msnm
Precisión (h;v)	0.022 ; 0.023	m
Equipo	Trimble R4	
Altura antena	2	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	X
Suave (5 a 12%)	
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

— Sedimentos dendríticos— ·
— — — -Alfisoles — — — ·
— –(Datos Abiertos CM) — ·

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	X
Ausente	

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	
Húmedo	X
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	#	Objetivo	tipo
	#		tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	
Sol y nubes	X
Nublado	
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	
Cultivo	Olivar
Erial	
Extracción o vertido	
Otro	

MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	37.1 °C	Temp T2	°C
Acimut solar	252 °	Altura solar	71 °

IMPACTOS CERCANOS

Poblados	
Carreteras	X
Depósitos de residuos	
Industria	
Otros	

ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	Seco
Color	Verde
Vegetación circundante	Herbácea

CROQUIS

OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

Muestra de la vegetación circundante __
del olivar debido a la sequedad __ __ __
Olivar en mal estado a la vista __ __ __
Distrito -> 014 – 01 __ __ __ __ __ __
A 124m al Sureste del planificado __ __
__ __ __ __ __ __ __ __ __ __ __ __

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
senescyt
INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR
TEPRO CONSULTORES AGRÍCOLAS, S.L.

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Comunidad	Madrid
Provincia	Madrid
Municipio	San Martín de la Vega
Sector	Mahorsa

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	MAD – S – 014
Fecha	23-06-2021
Hora	18:26 PM
Fotografías	Mad (59 a 63)

POSICIONAMIENTO

(UTM, WGS84 Z30N)

Coord. X	454076.547	m
Coord. Y	4456352.285	m
Altitud	518.007	msnm
Precisión (h;v)	0.027 ; 0.031	m
Equipo	Trimble R4	
Altura antena	2	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	X
Suave (5 a 12%)	
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

— Sedimentos dendríticos— · — — — -Entisoles— — — · — –(Datos Abiertos CM) — ·

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	X
Ausente	

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	X
Húmedo	
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	#	Objetivo	tipo
	#		tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	
Sol y nubes	X
Nublado	
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	
Cultivo	
Erial	
Extracción o vertido	X
Otro	

MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	28.9 °C	Temp T2	°C
Acimut solar	246 °	Altura solar	71 °

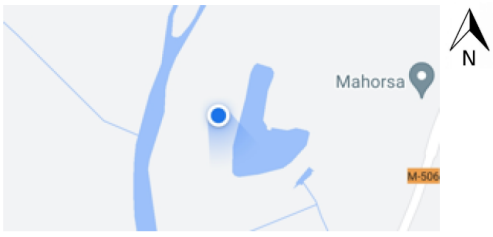
IMPACTOS CERCANOS

Poblados	
Carreteras	X
Depósitos de residuos	
Industria	
Otros	Minera

ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	
Color	
Vegetación circundante	

CROQUIS



OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

No es prudente tomar muestra en agua dentro de minera, ese punto se suprime (a 108m) *MAD – A – 015 (N/A) A 51m al Sureste del planificado Distrito -> 132 – 01 1.25 Kg de peso de muestra (campo)

POLITÉCNICA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

senescyt

INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR

TEPRO CONSULTORES AGRÍCOLAS, S.L.

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Comunidad	Madrid
Provincia	Madrid
Municipio	San Martín de la Vega
Sector	Reserva Ornitológica

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	MAD – C – 016
Fecha	23-06-2021
Hora	18:58 PM
Fotografías	Mad (74 a 82)

POSICIONAMIENTO

(UTM, WGS84 Z30N)

Coord. X	451951.724	m
Coord. Y	4452553.598	m
Altitud	517.517	msnm
Precisión (h;v)	0.025 ; 0.036	m
Equipo	Trimble R4	
Altura antena	2	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	
Suave (5 a 12%)	X
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

— Sedimentos dendríticos— · — — — -Entisoles— — — · — –(Datos Abiertos CM) — ·

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	
Ausente	X

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	
Húmedo	
Mojado	X

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	#	Objetivo	tipo
	#		tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	
Sol y nubes	X
Nublado	
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	X
Cultivo	
Erial	
Extracción o vertido	
Otro	

MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	23.7 °C	Temp T2	°C
Acimut solar	260 °	Altura solar	62 °

IMPACTOS CERCANOS

Poblados	X
Carreteras	X
Depósitos de residuos	
Industria	
Otros	

ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	N/A
Color	Verde
Vegetación circundante	Herbácea

CROQUIS

OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

A 3m de plantas al Oste del punto GPS_
A 34m al Suroeste del planificado
Distrito -> 132 – 01
Difícil acceso para captura de muestra;
natural de reserva

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID · senescyt · INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR · TEPRO CONSULTORES AGRÍCOLAS, S.L.

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Comunidad	Madrid
Provincia	Madrid
Municipio	San Martín de la Vega
Sector	Reserva Ornitológica

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	MAD – C – 017
Fecha	23-06-2021
Hora	18:50 PM
Fotografías	Mad (64 a 73)

POSICIONAMIENTO

(UTM, WGS84 Z30N)

Coord. X	451930.347	m
Coord. Y	4452577.021	m
Altitud	516.829	msnm
Precisión (h;v)	0.025 ; 0.032	m
Equipo	Trimble R4	
Altura antena	2	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	X
Suave (5 a 12%)	
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

— Sedimentos dendríticos— · — — — -Entisoles— — — · — –(Datos Abiertos CM) — ·

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	
Ausente	X

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	
Húmedo	X
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	#	Objetivo	tipo
	#		tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	
Sol y nubes	X
Nublado	
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	
Cultivo	Maíz
Erial	
Extracción o vertido	
Otro	

MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	30.7 °C	Temp T2	°C
Acimut solar	258 °	Altura solar	66 °

IMPACTOS CERCANOS

Poblados	
Carreteras	X
Depósitos de residuos	
Industria	
Otros	

CROQUIS

ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	Nigguno
Color	Verde
Vegetación circundante	N/A

OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

A 510m al Sur del planificado
Distrito -> 132 – 01
Los datos de suelo son de sitios próximos al cultivo

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID · senescyt · INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR · TEPRO CONSULTORES AGRÍCOLAS, S.L.

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Comunidad	Madrid
Provincia	Madrid
Municipio	San Martín de la Vega
Sector	Arroyo de las Esparinas

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	MAD – S – 018
Fecha	23-06-2021
Hora	19:41 PM
Fotografías	Mad (83 a 90)

POSICIONAMIENTO

(UTM, WGS84 Z30N)

Coord. X	449278.278	m
Coord. Y	4450467.042	m
Altitud	553.172	msnm
Precisión (h;v)	0.022 ; 0.028	m
Equipo	Trimble R4	
Altura antena	2	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	
Suave (5 a 12%)	
Media a fuerte (>12%)	X

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

—Yesos y arcillas yesíferas- · — –Inceptisol / Entisoles — · — –(Datos Abiertos CM) — ·

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	X
Ausente	

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	X
Húmedo	
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	#	Objetivo	tipo
	#		tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	
Sol y nubes	X
Nublado	
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	
Cultivo	
Erial	X
Extracción o vertido	
Otro	

MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	24.3 °C	Temp T2	°C
Acimut solar	258 °	Altura solar	61 °

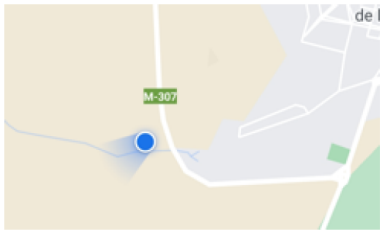
IMPACTOS CERCANOS

Poblados	
Carreteras	X
Depósitos de residuos	
Industria	
Otros	Minera

ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	N/A
Color	Verde
Vegetación circundante	Herbácea

CROQUIS



OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

Ingreso restringido a minera, por ende, modificado punto a 864m al Sureste del planificado Distrito -> 132 – 01 Punto MAD – S – 019 no considerado debido a que esta fuera del trayecto 0.9 Kg de peso de muestra (campo)

POLITÉCNICA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

senescyt

INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR

TEPRO CONSULTORES AGRÍCOLAS, S.L.

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Comunidad	Madrid
Provincia	Madrid
Municipio	Ciempozuelos
Sector	Trincheras Ciempozuelos

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	MAD – S – 020
Fecha	23-06-2021
Hora	20:17 PM
Fotografías	Mad (91 a 94)

POSICIONAMIENTO (UTM, WGS84 Z30N)

Coord. X	444903.569	m
Coord. Y	4443064.822	m
Altitud	606.198	msnm
Precisión (h;v)	0.029 ; 0.035	m
Equipo	Trimble R4	
Altura antena	2	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	
Suave (5 a 12%)	X
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

—Yesos y arcillas yesíferas-
— — —Inceptisoles- — —
— –(Datos Abiertos CM) —

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	X
Ocasional	
Ausente	

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	X
Húmedo	
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	#	Objetivo	tipo
	#		tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	
Sol y nubes	X
Nublado	
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	
Cultivo	
Erial	X
Extracción o vertido	
Otro	

MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	26.5 °C	Temp T2	°C
Acimut solar	262 °	Altura solar	53 °

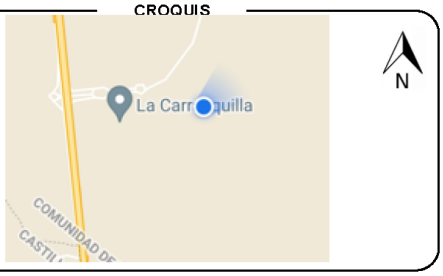
IMPACTOS CERCANOS

Poblados	
Carreteras	X
Depósitos de residuos	
Industria	X
Otros	

ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	N/A
Color	Verde
Vegetación circundante	Herbácea

CROQUIS



OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

Suelo desnudo altamente compacto
A 415m al Suroeste del planificado
Distrito -> 040 – 02
Afectado por transporte pesado
0.9 Kg de peso de muestra (campo)

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID · senescyt · INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR · TEPRO CONSULTORES AGRÍCOLAS, S.L.

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Comunidad	Madrid
Provincia	Madrid
Municipio	Ciempozuelos
Sector	Trincheras Ciempozuelos

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	MAD – S – 021
Fecha	23-06-2021
Hora	20:29 PM
Fotografías	Mad (95 a 100)

POSICIONAMIENTO

(UTM, WGS84 Z30N)

Coord. X	444908.491	m
Coord. Y	4442959.811	m
Altitud	607.926	msnm
Precisión (h;v)	0.023 ; 0.030	m
Equipo	Trimble R4	
Altura antena	2	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	X
Suave (5 a 12%)	
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

—Yesos y arcillas yesíferas- · — — —Inceptisoles- — — · — –(Datos Abiertos CM) — ·

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	X
Ausente	

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	
Húmedo	X
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	#	Objetivo	tipo
	#		tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	
Sol y nubes	X
Nublado	
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	
Cultivo	Cereales
Erial	
Extracción o vertido	
Otro	

MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	25.7 °C	Temp T2	°C
Acimut solar	268 °	Altura solar	52 °

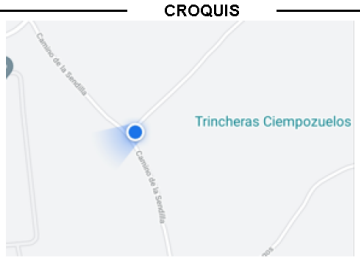
IMPACTOS CERCANOS

Poblados	
Carreteras	X
Depósitos de residuos	
Industria	X
Otros	Cables

ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	N/A
Color	Amarillo/Verde
Vegetación circundante	Herbácea

CROQUIS



OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

Se toma muestra de suelo y cultivo: Amarillo (cereal), seco (2/S); verde (herbáceo), (2/V)
A 402m al Suroeste del planificado
Distrito -> 040 – 02
0.95 Kg de peso de muestra de suelo

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

senescyt

INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR

TEPRO CONSULTORES AGRÍCOLAS, S.L.

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Comunidad	Madrid
Provincia	Madrid
Municipio	Ciempozuelos
Sector	EMSA

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	MAD – C – 022
Fecha	23-06-2021
Hora	21:07 PM
Fotografías	Mad (101 a 113)

POSICIONAMIENTO

(UTM, WGS84 Z30N)

Coord. X	442079.301	m
Coord. Y	4456176.771	m
Altitud	608.033	msnm
Precisión (h;v)	0.020 ; 0.026	m
Equipo	Trimble R4	
Altura antena	2	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	X
Suave (5 a 12%)	
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

—Yesos y arcillas yesíferas-
— — —Inceptisoles- — — —
— –(Datos Abiertos CM) —

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	
Ausente	X

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	
Húmedo	X
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	#	Objetivo	tipo
	#		tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	
Sol y nubes	X
Nublado	
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	
Cultivo	Cereales
Erial	
Extracción o vertido	
Otro	

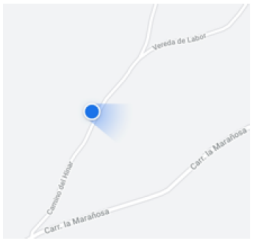
MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	23.9 °C	Temp T2	°C
Acimut solar	266 °	Altura solar	41 °

IMPACTOS CERCANOS

Poblados	
Carreteras	X
Depósitos de residuos	
Industria	
Otros	

CROQUIS



ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	N/A
Color	Amarillo
Vegetación circundante	N/A

OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

A 175m al Este del planificado
Distrito -> 040 – 02
Puntos MAD – C – 023 y MAD – S – 024
no se tomaron por falta de luz y
desviación de trayecto

POLITÉCNICA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
senescyt Secretaría Nacional de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación
INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR
TEPRO CONSULTORES AGRÍCOLAS, S.L.

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Comunidad	Andalucía
Provincia	Sevilla
Municipio	Sanlúcar la Mayor
Sector	Embalse de Guadiamar

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	SEV – C – 025
Fecha	29/06/2021
Hora	14:53 PM
Fotografías	Sev (40 a 43)

POSICIONAMIENTO

(UTM, WGS84 Z29N)

Coord. X	745627.244	m
Coord. Y	4144954.708	m
Altitud	29.793	msnm
Precisión (h;v)	0.023 ; 0.036	m
Equipo	Trimble R4	
Altura antena	2	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	X
Suave (5 a 12%)	
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

—— —Sedimentos dentríticos- —— ·
—— —Luvisoles / cambisoles- —— ·
—— —— —— -(REDIAM)— —— —— ·

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	
Ausente	X

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	
Húmedo	X
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	#	Objetivo	tipo
	#		tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	X
Sol y nubes	
Nublado	
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	
Cultivo	Tomate
Erial	
Extracción o vertido	
Otro	

MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	35.1 °C	Temp T2	34.4 °C
Acimut solar	188 °	Altura solar	90 °

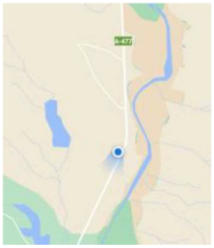
IMPACTOS CERCANOS

Poblados	
Carreteras	X
Depósitos de residuos	
Industria	
Otros	

ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	
Color	
Vegetación circundante	

CROQUIS



OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

A 634m al Sureste del planificado __ _
Distrito -> 4108702 __ __ __ __ __ _
No se ingresa al punto planificado para no dañar el cultivo __ __ __ __ __ __ _
__ __ __ __ __ __ __ __ __ __ __
__ __ __ __ __ __ __ __ __ __ __

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
senescyt
INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR
TEPRO CONSULTORES AGRÍCOLAS, S.L.

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Comunidad	Andalucía
Provincia	Sevilla
Municipio	Aznalcóllar
Sector	Carr. Sanlúcar

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	SEV – S – 026
Fecha	29/06/2021
Hora	14:37 PM
Fotografías	Sev (36 a 39)

POSICIONAMIENTO (UTM, WGS84 Z29N)

Coord. X	744202.160	m
Coord. Y	4151018.497	m
Altitud	68.968	msnm
Precisión (h;v)	0.024 ; 0.033	m
Equipo	Trimble R4	
Altura antena	2	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	X
Suave (5 a 12%)	
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

—— —Sedimentos dentríticos- —— ·
—— —Luvisoles / cambisoles- —— ·
—— —— —— -(REDIAM)—— —— —— ·

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	X
Ausente	

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	X
Húmedo	
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	#	Objetivo	tipo
	#		tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	X
Sol y nubes	
Nublado	
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	
Cultivo	
Erial	X
Extracción o vertido	
Otro	

MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	55.5 °C	Temp T2	50.1 °C
Acimut solar	190 °	Altura solar	90 °

IMPACTOS CERCANOS

Poblados	
Carreteras	X
Depósitos de residuos	
Industria	
Otros	Cables

CROQUIS

ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	
Color	
Vegetación circundante	

OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

A 292m al Sureste del planificado
Vertedero de basura y quema de desechos
Distrito -> 4101302
2.10 Kg de peso de muestra

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID · senescyt · INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR · TEPRO CONSULTORES AGRÍCOLAS, S.L.

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Comunidad	Andalucía
Provincia	Sevilla
Municipio	Aznalcóllar
Sector	Minera los Frailes

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	SEV – S – 027
Fecha	29/06/2021
Hora	12:15 PM
Fotografías	Sev (14 a 17)

POSICIONAMIENTO (UTM, WGS84 Z29N)

Coord. X	745276.705	m
Coord. Y	4155258.963	m
Altitud	54.365	msnm
Precisión (h;v)	0.031 ; 0.038	m
Equipo	Trimble R4	
Altura antena	2	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	
Suave (5 a 12%)	X
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

—·—Sedimentos dentríticos-·—·
—·—Regosoles / cambisoles-·—·
—·—·—-(REDIAM)—·—·—·

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	X
NO	

PEDREGOSIDAD

Abundante	X
Ocasional	
Ausente	

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	X
Húmedo	
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	#	Objetivo	tipo
	#		tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	X
Sol y nubes	
Nublado	
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	X
Herbácea	
Cultivo	
Erial	
Extracción o vertido	
Otro	

MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	41.1 °C	Temp T2	37.6 °C
Acimut solar	104 °	Altura solar	76 °

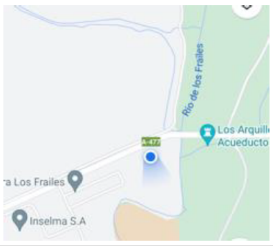
IMPACTOS CERCANOS

Poblados	
Carreteras	
Depósitos de residuos	X
Industria	
Otros	Minera

ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	
Color	
Vegetación circundante	

CROQUIS



OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

No hay acceso a minera, se toma punto a 1.62 Km al Este del planificado, lo mas cercano
Distrito -> 4109601
0.9 Kg de peso de muestra

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Comunidad	Andalucía
Provincia	Sevilla
Municipio	Aznalcóllar
Sector	Arroyo del Lucio de Prado

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	SEV – C – 028
Fecha	29/06/2021
Hora	13:13 PM
Fotografías	Sev (22 a 25)

POSICIONAMIENTO

(UTM, WGS84 Z29N)

Coord. X	736492.330	m
Coord. Y	4152448.827	m
Altitud	91.254	msnm
Precisión (h;v)	0.023 ; 0.028	m
Equipo	Trimble R4	
Altura antena	2	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	
Suave (5 a 12%)	X
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

—Calcarenitas, margas, calizas—
— —Vertisoles / cambisoles- —
— — — -(REDIAM)— — —

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	
Ausente	X

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	X
Húmedo	
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	#	Objetivo	tipo
	#		tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	X
Sol y nubes	
Nublado	
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	
Cultivo	Girasol
Erial	
Extracción o vertido	
Otro	

MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	45.6 °C	Temp T2	42.4 °C
Acimut solar	124 °	Altura solar	90 °

IMPACTOS CERCANOS

Poblados	
Carreteras	
Depósitos de residuos	
Industria	
Otros	Cables

CROQUIS

ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	N/A
Color	Verde
Vegetación circundante	Herbáceo

OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

A 332m al Suroeste del planificado
Distrito -> 4101302
Se evidencia poco cuidado del cultivo

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
senescyt
INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR
TEPRO CONSULTORES AGRÍCOLAS, S.L.

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Comunidad	Andalucía
Provincia	Sevilla
Municipio	Aznalcóllar
Sector	Arroyo del Lucio de Prado

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	SEV – S – 029
Fecha	29/06/2021
Hora	13:23 PM
Fotografías	Sev (26 a 30)

POSICIONAMIENTO (UTM, WGS84 Z29N)

Coord. X	736473.913	m
Coord. Y	4152369.622	m
Altitud	97.713	msnm
Precisión (h;v)	0.023 ; 0.028	m
Equipo	Trimble R4	
Altura antena	2	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	
Suave (5 a 12%)	X
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

—Calcarenitas, margas, calizas— ·
— —Vertisoles / cambisoles- — ·
— — — -(REDIAM)— — — ·

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	X
Ausente	

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	X
Húmedo	
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	#	Objetivo	tipo
	#		tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	X
Sol y nubes	
Nublado	
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	
Cultivo	
Erial	
Extracción o vertido	
Otro	Suelo desnudo

MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	41 °C	Temp T2	44.7 °C
Acimut solar	128 °	Altura solar	90 °

IMPACTOS CERCANOS

Poblados	
Carreteras	
Depósitos de residuos	
Industria	
Otros	Cables

ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	
Color	
Vegetación circundante	

CROQUIS

OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

A 170m al Noroeste del planificado
Distrito -> 4101302
Suelo cosechado actualmente
1.25 Kg de peso de muestra

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID · senescyt · INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR · TEPRO CONSULTORES AGRÍCOLAS, S.L.

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Comunidad	Andalucía
Provincia	Sevilla
Municipio	Aznalcóllar
Sector	Arroyo del Lucio de Prado

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	SEV – C – 030
Fecha	29/06/2021
Hora	12:50 PM
Fotografías	Sev (18 a 21)

POSICIONAMIENTO

(UTM, WGS84 Z29N)

Coord. X	736443.086	m
Coord. Y	4152601.096	m
Altitud	94.188	msnm
Precisión (h;v)	0.023 ; 0.028	m
Equipo	Trimble R4	
Altura antena	2	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	
Suave (5 a 12%)	X
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

—Calcarenitas, margas, calizas— · — —Vertisoles / cambisoles- — · — — — -(REDIAM)— — — ·

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	
Ausente	X

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	X
Húmedo	
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	#	Objetivo	tipo
	#		tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	X
Sol y nubes	
Nublado	
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	
Cultivo	Olivar
Erial	
Extracción o vertido	
Otro	

MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	50.7 °C	Temp T2	52.1 °C
Acimut solar	118 °	Altura solar	89 °

IMPACTOS CERCANOS

Poblados	
Carreteras	
Depósitos de residuos	
Industria	
Otros	

CROQUIS

ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	N/A
Color	Verde
Vegetación circundante	Herbáceo

OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

A 156m al Suroeste del planificado
Distrito -> 4101302
Olivar de tipo intensivo

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Comunidad	Andalucía
Provincia	Sevilla
Municipio	Castilleja del Campo
Sector	Ayuntamiento

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	SEV – S – 031
Fecha	29/06/2021
Hora	14:14 PM
Fotografías	Sev (31 a 35)

POSICIONAMIENTO (UTM, WGS84 Z29N)

Coord. X	736724.939	m
Coord. Y	4141006.878	m
Altitud	128.347	msnm
Precisión (h;v)	0.023 ; 0.032	m
Equipo	Trimble R4	
Altura antena	2	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	
Suave (5 a 12%)	X
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

—Calcarenitas, margas, calizas— · — —Regosoles / cambisoles· — · — — — -(REDIAM)— — — ·

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	X
NO	

PEDREGOSIDAD

Abundante	X
Ocasional	
Ausente	

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	X
Húmedo	
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	#	Objetivo	tipo
	#		tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	X
Sol y nubes	
Nublado	
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	
Cultivo	
Erial	X
Extracción o vertido	
Otro	

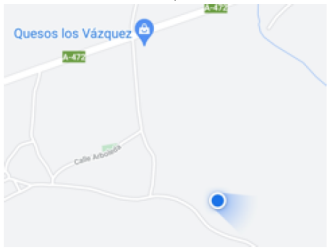
MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	52.9 °C	Temp T2	44.3 °C
Acimut solar	162 °	Altura solar	90 °

IMPACTOS CERCANOS

Poblados	
Carreteras	
Depósitos de residuos	X
Industria	
Otros	

CROQUIS



ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	
Color	
Vegetación circundante	

OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

A 242m al Suroeste del planificado __ _
Distrito -> 4101301 __ __ __ __ __ _
Vertedero de basura y quema de desechos
1.10 Kg de peso de muestra __ __ __ _
— — — — — — — — — — — —
— — — — — — — — — — — —

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

senescyt

INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR

TEPRO CONSULTORES AGRÍCOLAS, S.L.

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Comunidad	Andalucía
Provincia	Sevilla
Municipio	Benacazón
Sector	Arroyo de Molinillo

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	SEV – S – 032
Fecha	29/06/2021
Hora	15:43 PM
Fotografías	Sev (48 a 53)

POSICIONAMIENTO

(UTM, WGS84 Z29N)

Coord. X	745202.453	m
Coord. Y	4139600.269	m
Altitud	19.788	msnm
Precisión (h;v)	0.022 ; 0.027	m
Equipo	Trimble R4	
Altura antena	2	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	
Suave (5 a 12%)	X
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

—·—Sedimentos dentríticos-·—·
—·—·—·Fluviosoles—·—·—·
—·—·—·-(REDIAM)—·—·—·

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	X
NO	

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	X
Ausente	

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	X
Húmedo	
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	#	Objetivo	tipo
	#		tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	X
Sol y nubes	
Nublado	
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	
Cultivo	
Erial	X
Extracción o vertido	
Otro	

MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	53.5 °C	Temp T2	54.2 °C
Acimut solar	236 °	Altura solar	85 °

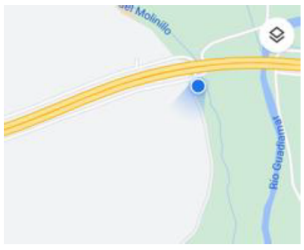
IMPACTOS CERCANOS

Poblados	
Carreteras	X
Depósitos de residuos	
Industria	
Otros	Cables

ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	
Color	
Vegetación circundante	

CROQUIS



OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

Acceso restringido, paso cerrado, se ingresó a pie Distrito -> 4101501 A 421m al Noreste del planificado SEV – S – 033 no se pudo ingresar a la propiedad 1.45 Kg de peso de muestra

POLITÉCNICA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

senescyt Secretaría Nacional de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación

INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR

TEPRO CONSULTORES AGRÍCOLAS, S.L.

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Comunidad	Andalucía
Provincia	Sevilla
Municipio	Benacazón
Sector	Arroyo de Molinillo

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	SEV – S – 034
Fecha	29/06/2021
Hora	15:16 PM
Fotografías	Sev (44 a 47)

POSICIONAMIENTO (UTM, WGS84 Z29N)

Coord. X	744419.610	m
Coord. Y	4139472.597	m
Altitud	27.001	msnm
Precisión (h;v)	0.023 ; 0.032	m
Equipo	Trimble R4	
Altura antena	2	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	X
Suave (5 a 12%)	
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

- —Sedimentos dentríticos-
- ·Fluviosoles—
- -(REDIAM)

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	
Ausente	X

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	X
Húmedo	
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	#	Objetivo	tipo
	#		tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	X
Sol y nubes	
Nublado	
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	
Cultivo	Cereales
Erial	
Extracción o vertido	
Otro	

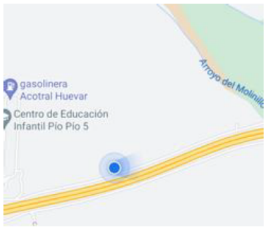
MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	36.9 °C	Temp T2	37.2 °C
Acimut solar	230 °	Altura solar	80 °

IMPACTOS CERCANOS

Poblados	X
Carreteras	
Depósitos de residuos	
Industria	
Otros	

CROQUIS



ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	
Color	
Vegetación circundante	

OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

A 204m al Suroeste del planificado
Distrito -> 4101501
Se encuentran en cosecha
1.95 Kg de peso de muestra

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID · senescyt · INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR · TEPRO CONSULTORES AGRÍCOLAS, S.L.

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Comunidad	Andalucía
Provincia	Sevilla
Municipio	Aznalcázar
Sector	Laguna María Ventura

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	SEV – S – 037
Fecha	30/06/2021
Hora	17:04 PM
Fotografías	Sev (93 a 96)

POSICIONAMIENTO (UTM, WGS84 Z29N)

Coord. X	744483.088	m
Coord. Y	4119950.390	m
Altitud	4.436	msnm
Precisión (h;v)	0.023 ; 0.025	m
Equipo	Trimble R4	
Altura antena	2	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	
Suave (5 a 12%)	X
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

—— —Sedimentos dendríticos- —— ·
—— —Cambisoles / Luvisoles- —— ·
—— —— —— -(REDIAM)— —— —— ·

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	X
Ausente	

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	X
Húmedo	
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	#	Objetivo	tipo
	#		tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	X
Sol y nubes	
Nublado	
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	X
Cultivo	
Erial	
Extracción o vertido	
Otro	

MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	51.7 °C	Temp T2	50.9 °C
Acimut solar	252 °	Altura solar	66 °

IMPACTOS CERCANOS

Poblados	
Carreteras	X
Depósitos de residuos	
Industria	
Otros	

ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	
Color	
Vegetación circundante	

CROQUIS

OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

Punto GPS desplazado 1.5m a la carretera
Distrito -> 4101201
SEV – S – 036 y 037 fincas privada solo se logra ingresar a 037
0.7 Kg de peso de muestra
A 615m al Suroeste del planificado

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
senescyt
INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR
TEPRO CONSULTORES AGRÍCOLAS, S.L.

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Comunidad	Andalucía
Provincia	Sevilla
Municipio	Aznalcázar
Sector	Caño del Puerto

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	SEV – C – 038
Fecha	30/06/2021
Hora	16:50 PM
Fotografías	Sev (89 a 92)

POSICIONAMIENTO (UTM, WGS84 Z29N)

Coord. X	746693.999	m
Coord. Y	4120482.649	m
Altitud	3.642	msnm
Precisión (h;v)	0.023 ; 0.025	m
Equipo	Trimble R4	
Altura antena	2	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	X
Suave (5 a 12%)	
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

—— —Sedimentos dendríticos- —— ·
—— —— —— Solonchaks—— —— —— ·
—— —— —— -(REDIAM)—— —— —— ·

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	
Ausente	X

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	
Húmedo	
Mojado	X

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	# 17, 18 y 21	Objetivo	Vegetación tipo
	# 20		Suelo tipo
	# 19		Algas tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	X
Sol y nubes	
Nublado	
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	
Cultivo	Arroz
Erial	
Extracción o vertido	
Otro	

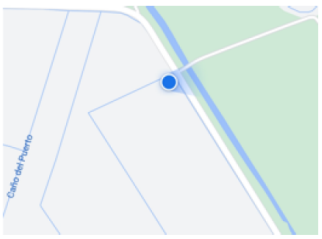
MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	52.4 °C	Temp T2	51.4 °C
Acimut solar	244 °	Altura solar	70 °

IMPACTOS CERCANOS

Poblados	X
Carreteras	X
Depósitos de residuos	
Industria	
Otros	Cables

CROQUIS



ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	N/A
Color	Verde
Vegetación circundante	N/A

OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

Información de relieve circundante
A 1.74m al Noreste del planificado
Distrito -> 4101201
Punto GPS lo mas próximo al cultivo

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID · senescyt · INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR · TEPRO CONSULTORES AGRÍCOLAS, S.L.

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Comunidad	Andalucía
Provincia	Sevilla
Municipio	La Puebla del Río
Sector	Lucio del Cuquero Grande

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	SEV – S – 041
Fecha	30/06/2021
Hora	11:50 AM
Fotografías	Sev (58 a 61)

POSICIONAMIENTO (UTM, WGS84 Z29N)

Coord. X	745524.435	m
Coord. Y	4098786.871	m
Altitud	1.482	msnm
Precisión (h;v)	1.311 ; 1.076	m
Equipo	Trimble R4	
Altura antena	2	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	X
Suave (5 a 12%)	
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

- Sedimentos dendríticos-
- Solonchaks
- -(REDIAM)

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	
Ausente	X

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	
Húmedo	X
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	#	Objetivo	tipo
	#		tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	X
Sol y nubes	
Nublado	
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	X
Cultivo	
Erial	
Extracción o vertido	
Otro	

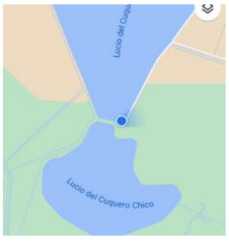
MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	23.1 °C	Temp T2	31.4 °C
Acimut solar	82 °	Altura solar	66 °

IMPACTOS CERCANOS

Poblados	
Carreteras	X
Depósitos de residuos	
Industria	
Otros	

CROQUIS



ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	
Color	
Vegetación circundante	

OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

Se retira espectro ASD de IFAPA
Punto en propiedad privada, acceso limitado, se desplaza SEV – S – 044 A 798m al Noreste del planificado
Distrito -> 4107901
0.85 Kg de peso de muestra
No existe cuerpo de agua SEV – A – 040, no se captura el punto

POLITÉCNICA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID — senescyt — INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR — TEPRO CONSULTORES AGRÍCOLAS, S.L.

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Comunidad	Andalucía
Provincia	Sevilla
Municipio	Isla Mayor
Sector	Secadero Santa Sofía

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	SEV – S – 042
Fecha	30/06/2021
Hora	13:22 PM
Fotografías	Sev (62 a 64)

POSICIONAMIENTO (UTM, WGS84 Z29N)

Coord. X	754329.316	m
Coord. Y	4108035.394	m
Altitud	2.007	msnm
Precisión (h;v)	0.022 ; 0.029	m
Equipo	Trimble R4	
Altura antena	2	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	X
Suave (5 a 12%)	
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

— —Sedimentos dendríticos- — ·
— — — Solonchaks— — — ·
— — — -(REDIAM)— — — ·

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	
Ausente	X

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	X
Húmedo	
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	# 1	Objetivo	Suelo tipo
	# 2		Suelo tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	X
Sol y nubes	
Nublado	
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	
Cultivo	
Erial	
Extracción o vertido	
Otro	Suelo desnudo

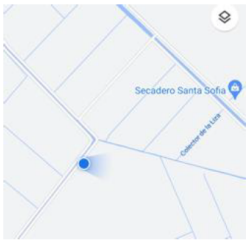
MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	45.3 °C	Temp T2	44.9 °C
Acimut solar	128 °	Altura solar	84 °

IMPACTOS CERCANOS

Poblados	
Carreteras	X
Depósitos de residuos	
Industria	
Otros	

CROQUIS



ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	
Color	
Vegetación circundante	

OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

No hay acceso, se modifica punto a 6.6 Km al Norte
Se cultiva arroz, actualmente sin riego la parcela
Distrito -> 4190201
1.3 Kg de peso de muestra

POLITÉCNICA — UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID — senescyt — INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR — TEPRO CONSULTORES AGRÍCOLAS, S.L.

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Comunidad	Andalucía
Provincia	Sevilla
Municipio	Isla Mayor
Sector	Isla Mayor

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	SEV – S – 043
Fecha	30/06/2021
Hora	16:09 PM
Fotografías	Sev (84 a 88)

POSICIONAMIENTO

(UTM, WGS84 Z29N)

Coord. X	752530.833	m
Coord. Y	4114245.526	m
Altitud	2.366	msnm
Precisión (h;v)	0.025 ; 0.028	m
Equipo	Trimble R4	
Altura antena	2	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	X
Suave (5 a 12%)	
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

—— —Sedimentos dendríticos- —— ·
— — — — Solonchaks— — — — ·
— — — — -(REDIAM)— — — — ·

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	
Ausente	X

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	X
Húmedo	
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	# 13 y 14	Objetivo	Suelo tipo
	# 15		Suelo tipo
	# 16		Blanco tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	X
Sol y nubes	
Nublado	
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	
Cultivo	
Erial	
Extracción o vertido	
Otro	Suelo desnudo

MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	44.3 °C	Temp T2	48.3 °C
Acimut solar	232 °	Altura solar	78 °

IMPACTOS CERCANOS

Poblados	X
Carreteras	X
Depósitos de residuos	
Industria	
Otros	

CROQUIS

ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	
Color	
Vegetación circundante	

OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

Se cultiva arroz actualmente, parcela sin riego
A 147m al Norte del planificado
Distrito -> 4190201
No hay foto #85
1 Kg de peso de muestra

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
senescyt
INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR
TEPRO CONSULTORES AGRÍCOLAS, S.L.

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Comunidad	Andalucía
Provincia	Sevilla
Municipio	La Puebla del Río
Sector	Urbanización Vistasol

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	SEV – S – 045
Fecha	30/06/2021
Hora	17:32 PM
Fotografías	Sev (97 a 101)

POSICIONAMIENTO (UTM, WGS84 Z29N)

Coord. X	757709.859	m
Coord. Y	4126102.803	m
Altitud	2.695	msnm
Precisión (h;v)	0.025 ; 0.028	m
Equipo	Trimble R4	
Altura antena	2	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	X
Suave (5 a 12%)	
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

— —Sedimentos dendríticos- — ·
— — — Solonchaks— — — ·
— — — -(REDIAM)— — — ·

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	
Ausente	X

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	X
Húmedo	
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	# 22, 23, 24	Objetivo	Suelo tipo
	# 26		Agua tipo
	# 27		Algas tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	X
Sol y nubes	
Nublado	
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	
Cultivo	
Erial	
Extracción o vertido	
Otro	Suelo desnudo

MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	43.5 °C	Temp T2	45.5 °C
Acimut solar	254 °	Altura solar	59 °

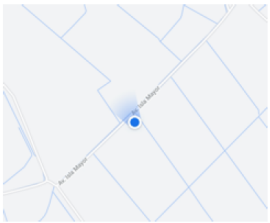
IMPACTOS CERCANOS

Poblados	
Carreteras	
Depósitos de residuos	
Industria	
Otros	

ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	
Color	
Vegetación circundante	

CROQUIS



OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

25 no puede borrar firma
Distrito -> 4107901
Cultivo de arroz, actualmente parcela sin riego
1.7 Kg de peso de muestra
A 299m al Noreste del planificado

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
senescyt
INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR
TEPRO CONSULTORES AGRÍCOLAS, S.L.

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Comunidad	Andalucía
Provincia	Sevilla
Municipio	La Puebla del Río
Sector	Calle Juncales

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	SEV – C – 046
Fecha	30/06/2021
Hora	17:56 PM
Fotografías	Sev (102 a 106)

POSICIONAMIENTO (UTM, WGS84 Z29N)

Coord. X	758974.064	m
Coord. Y	4127812.790	m
Altitud	3.485	msnm
Precisión (h;v)	0.025 ; 0.029	m
Equipo	Trimble R4	
Altura antena	2	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	X
Suave (5 a 12%)	
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

- Sedimentos dendríticos-
- Solonchaks
- -(REDIAM)

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	
Ausente	

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	
Húmedo	
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	# 28, 30	Objetivo	Cultivo tipo
	# 31		Algas tipo
	# 32		Agua tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	X
Sol y nubes	
Nublado	
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	
Cultivo	Arroz
Erial	
Extracción o vertido	
Otro	

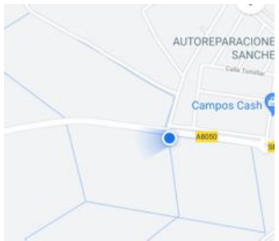
MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	34.7 °C	Temp T2	36.3 °C
Acimut solar	258 °	Altura solar	62 °

IMPACTOS CERCANOS

Poblados	X
Carreteras	X
Depósitos de residuos	
Industria	
Otros	Cables

CROQUIS



ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	N/A
Color	Verde
Vegetación circundante	N/A

OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

Tambien muestra de agua del mismo sector 046
Firma 29 o vale
A 314m al Noreste del planificado
Distrito -> 4107901
Muestra con presencia de suelo
Información de relieves circundantes

POLITÉCNICA — UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID — senescyt — INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR — TEPRO CONSULTORES AGRÍCOLAS, S.L.

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Comunidad	Andalucía
Provincia	Sevilla
Municipio	Valencina de la Concepción
Sector	Hacienda de Torrijos

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	SEV – C – 047
Fecha	29/06/2021
Hora	9:47 AM
Fotografías	Sev (1 a 4)

POSICIONAMIENTO (UTM, WGS84 Z29N)

Coord. X	757604.072	m
Coord. Y	4144205.989	m
Altitud	131.180	msnm
Precisión (h;v)	0.031 ; 0.029	m
Equipo	Trimble R4	
Altura antena	2	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	
Suave (5 a 12%)	X
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

—Calcarenitas, margas, calizas— · — —Regosoles y cambisoles — · — — — -(REDIAM)— — — ·

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	
Ausente	X

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	X
Húmedo	
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	#	Objetivo	tipo
	#		tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	X
Sol y nubes	
Nublado	
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	
Cultivo	Girasol
Erial	
Extracción o vertido	
Otro	

MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	23.5 °C	Temp T2	23.8 °C
Acimut solar	78 °	Altura solar	63 °

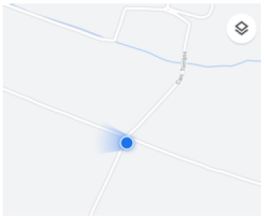
IMPACTOS CERCANOS

Poblados	
Carreteras	
Depósitos de residuos	
Industria	
Otros	Cables

ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	N/A
Color	Verde
Vegetación circundante	Herbácea

CROQUIS



OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

Se toma como muestra las hojas de cultivo
A 395m al Noroeste del planificado
Distrito -> 4109601

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID · senescyt · INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR · TEPRO CONSULTORES AGRÍCOLAS, S.L.

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Comunidad	Andalucía
Provincia	Sevilla
Municipio	Valencina de la Concepción
Sector	Hacienda de Torrijos

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	SEV – C – 048
Fecha	29/06/2021
Hora	9:58 AM
Fotografías	#

POSICIONAMIENTO

(UTM, WGS84 Z29N)

Coord. X	757579.586	m
Coord. Y	4142268.920	m
Altitud	128.144	msnm
Precisión (h;v)	0.028 ; 0.028	m
Equipo	Trimble R4	
Altura antena	2	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	
Suave (5 a 12%)	X
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

—Calcarenitas, margas, calizas— · — —Regosoles y cambisoles — · — — — -(REDIAM)— — — ·

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	
Ausente	X

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	X
Húmedo	
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	#	Objetivo	tipo
	#		tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	X
Sol y nubes	
Nublado	
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	
Cultivo	Olivar
Erial	
Extracción o vertido	
Otro	Herbácea

MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	20.0 °C	Temp T2	18.9 °C
Acimut solar	72 °	Altura solar	66 °

IMPACTOS CERCANOS

Poblados	
Carreteras	
Depósitos de residuos	
Industria	
Otros	Cables

CROQUIS

ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	N/A
Color	Verde
Vegetación circundante	N/A

OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

A 128m al Sureste del planificado
Distrito -> 4109601
No se pudo capturar fotografías de los olivares

POLITÉCNICA — UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID — senescyt — INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR — TEPRO CONSULTORES AGRÍCOLAS, S.L.

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Comunidad	Andalucía
Provincia	Sevilla
Municipio	Salteras
Sector	Arroyo del Juradillo

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	SEV – S – **049**
Fecha	29/06/2021
Hora	10:30 AM
Fotografías	Sev (5 a 9)

POSICIONAMIENTO

(UTM, WGS84 Z29N)

Coord. X	756062.420	m
Coord. Y	4147852.254	m
Altitud	55.081	msnm
Precisión (h;v)	0.025 ; 0.028	m
Equipo	Trimble R4	
Altura antena	2	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	X
Suave (5 a 12%)	
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

—Calcarenitas, margas, calizas—
— —Vertisoles y cambisoles- —
— — — -(REDIAM)— — —

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	X
Ausente	

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	X
Húmedo	
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	#	Objetivo	tipo
	#		tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	
Sol y nubes	
Nublado	
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	
Cultivo	
Erial	
Extracción o vertido	
Otro	Suelo desnudo

MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	25.4 °C	Temp T2	24.4 °C
Acimut solar	86 °	Altura solar	65 °

IMPACTOS CERCANOS

Poblados	X
Carreteras	
Depósitos de residuos	
Industria	
Otros	Cables

ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	N/A
Color	Verde
Vegetación circundante	N/A

CROQUIS

OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

A 280m al Norte del planificado
Sitio cosechado, actualmente desnudo
Descarta SEV – A – **050,** no hay cuerpo de agua
Distrito -> 4109601
1.05 Kg de peso de muestra

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
senescyt
INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR
TEPRO CONSULTORES AGRÍCOLAS, S.L.

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Comunidad	Andalucía
Provincia	Sevilla
Municipio	Benacazón
Sector	Cañada del Pino Enano

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	SEV – S – 051
Fecha	01/07/2021
Hora	18:06 PM
Fotografías	Sev (156 a 161)

POSICIONAMIENTO

(UTM, WGS84 Z29N)

Coord. X	748501.257	m
Coord. Y	4133224.128	m
Altitud	63.922	msnm
Precisión (h;v)	0.025 ; 0.032	m
Equipo	Trimble R4	
Altura antena	2	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	X
Suave (5 a 12%)	
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

Calcarenitas, margas, calizas

Fluvisoles

(REDIAM)

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	X
Ausente	

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	X
Húmedo	
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	# 70 a 72	Objetivo	Suelo tipo
	# 73		Asfalto tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	X
Sol y nubes	
Nublado	
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	
Cultivo	
Erial	
Extracción o vertido	
Otro	Suelo desnudo

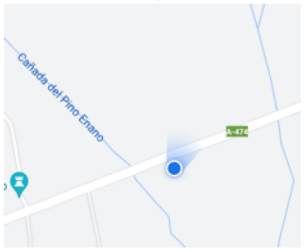
MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	52.6 °C	Temp T2	54.2 °C
Acimut solar	268 °	Altura solar	68 °

IMPACTOS CERCANOS

Poblados	
Carreteras	X
Depósitos de residuos	
Industria	
Otros	

CROQUIS



ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	
Color	
Vegetación circundante	

OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

A 234m al Sureste del planificado
Distrito -> 4101501
Cultivo de tipo herbáceo, actualmente sin producción
1.45 Kg de peso de muestra
Verificar firma #70 a 72

POLITÉCNICA — UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID — senescyt — INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR — TEPRO CONSULTORES AGRÍCOLAS, S.L.

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Comunidad	Andalucía
Provincia	Sevilla
Municipio	Benacazón
Sector	Cañada del Pino Enano

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	SEV – C – 052
Fecha	01/07/2021
Hora	18:34 PM
Fotografías	Sev (162 a 166)

POSICIONAMIENTO

(UTM, WGS84 Z29N)

Coord. X	748582.037	m
Coord. Y	4133275.822	m
Altitud	65.228	msnm
Precisión (h;v)	0.024 ; 0.032	m
Equipo	Trimble R4	
Altura antena	2	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	X
Suave (5 a 12%)	
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

Calcarenitas, margas, calizas
Fluvisoles
(REDIAM)

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	
Ausente	

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	
Húmedo	
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	# 75 a 77	Objetivo	Vegetación tipo
	# 74		Suelo tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	X
Sol y nubes	
Nublado	
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	
Cultivo	Olivar
Erial	
Extracción o vertido	
Otro	

MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	°C	Temp T2	°C
Acimut solar	°	Altura solar	°

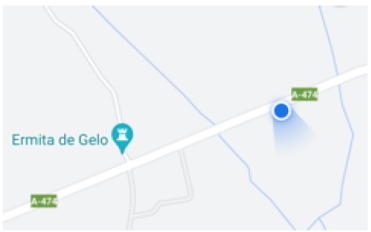
IMPACTOS CERCANOS

Poblados	
Carreteras	X
Depósitos de residuos	
Industria	
Otros	

ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	N/A
Color	Verde
Vegetación circundante	Herbácea

CROQUIS



OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

A 338m al Oeste del planificado
Distrito -> 4101501
Verificar firma #74

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
senescyt
INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR
TEPRO CONSULTORES AGRÍCOLAS, S.L.

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Comunidad	Andalucía
Provincia	Sevilla
Municipio	Bollullos de la Mitación
Sector	La Granja de Perico

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	SEV – S – 054
Fecha	29/06/2021
Hora	16:17 PM
Fotografías	Sev (54 a 57)

POSICIONAMIENTO (UTM, WGS84 Z29N)

Coord. X	752724.688	m
Coord. Y	4136813.240	m
Altitud	98.461	msnm
Precisión (h;v)	0.023 ; 0.028	m
Equipo	Trimble R4	
Altura antena	2	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	X
Suave (5 a 12%)	
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

—Calcarenitas, margas, calizas— ·
— —Luvisoles / cambisoles— — ·
— — — -(REDIAM)— — — ·

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	X
Ausente	

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	X
Húmedo	
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	#	Objetivo	tipo
	#		tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	X
Sol y nubes	
Nublado	
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	
Cultivo	
Erial	
Extracción o vertido	
Otro	Suelo desnudo

MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	56.5 °C	Temp T2	55.8 °C
Acimut solar	238 °	Altura solar	71 °

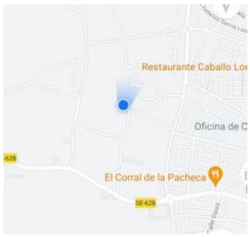
IMPACTOS CERCANOS

Poblados	
Carreteras	
Depósitos de residuos	
Industria	
Otros	Cables

ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	
Color	
Vegetación circundante	

CROQUIS



OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

Se cultivó cereales, pero en la actualidad se encuentra desnudo
A 72m al Sureste del planificado
Distrito -> 4101501
1.85 Kg de peso de muestra

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
senescyt
INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR
TEPRO CONSULTORES AGRÍCOLAS, S.L.

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Comunidad	Andalucía
Provincia	Sevilla
Municipio	Salteras
Sector	Cobre de las Cruces

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	SEV – S – 055
Fecha	29/06/2021
Hora	11:10 AM
Fotografías	Sev (10 a 13)

POSICIONAMIENTO (UTM, WGS84 Z29N)

Coord. X	757169.829	m
Coord. Y	4153183.602	m
Altitud	18.029	msnm
Precisión (h;v)	0.024 ; 0.031	m
Equipo	Trimble R4	
Altura antena	2	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	
Suave (5 a 12%)	X
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

—Calcarenitas, margas, calizas– · · · · -Vertisoles — — — · · · · -(REDIAM)— — — · ·

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	X
Ausente	

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	X
Húmedo	
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	#	Objetivo	tipo
	#		tipo
	#		tipo

MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	37 °C	Temp T2	33.1 °C
Acimut solar	82 °	Altura solar	65 °

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	X
Sol y nubes	
Nublado	
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	X
Cultivo	
Erial	
Extracción o vertido	
Otro	

IMPACTOS CERCANOS

Poblados	X
Carreteras	X
Depósitos de residuos	
Industria	X
Otros	Minera

CROQUIS

ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	
Color	
Vegetación circundante	

OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

A 196m al Sureste del planificado
Alta presencia de impactos cervano, por ejemplo minería
SEV – S – 056 no permiten ingreso a minera
Distrito -> 4109601
0.9 Kg de peso de muestra

POLITÉCNICA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID — senescyt — INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR — TEPRO CONSULTORES AGRÍCOLAS, S.L.

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Comunidad	Andalucía
Provincia	Sevilla
Municipio	Sevilla
Sector	Huerto Mi Rincón Sevilla

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	SEV – S – 058
Fecha	01/07/2021
Hora	10:31 AM
Fotografías	Sev (107 a 111)

POSICIONAMIENTO

(UTM, WGS84 Z29N)

Coord. X	768633.121	m
Coord. Y	4147987.236	m
Altitud	12.109	msnm
Precisión (h;v)	0.023 ; 0.022	m
Equipo	Trimble R4	
Altura antena	2	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	X
Suave (5 a 12%)	
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

—— —Sedimentos dendríticos- —— ·
—— —Regosoles / cambisoles- —— ·
—— —— —— -(REDIAM)— —— —— ·

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	
Ausente	X

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	X
Húmedo	
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	# 33, 34 y 36	Objetivo	Suelo tipo
	# 35		Vegetación tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	X
Sol y nubes	
Nublado	
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	
Cultivo	
Erial	X
Extracción o vertido	
Otro	

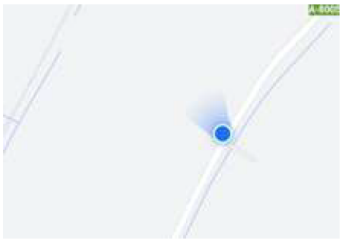
MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	39.6 °C	Temp T2	35.2 °C
Acimut solar	82 °	Altura solar	70 °

IMPACTOS CERCANOS

Poblados	X
Carreteras	X
Depósitos de residuos	
Industria	X
Otros	Cables

CROQUIS



ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	
Color	
Vegetación circundante	

OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

SEV – S – 057m a lado totalmente, no permiten ingresar
Suele ser ocupado por cultivo de cereal
A 145m al Sureste del planificado
Distrito -> 4109107
1.15 Kg de peso de muestra

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
senescyt
INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR
TEPRO CONSULTORES AGRÍCOLAS, S.L.

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Comunidad	Andalucía
Provincia	Sevilla
Municipio	Sevilla
Sector	Huerto Mi Rincón Sevilla

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	SEV – S – 059
Fecha	01/07/2021
Hora	10:48 AM
Fotografías	Sev (112 a 116)

POSICIONAMIENTO

(UTM, WGS84 Z29N)

Coord. X	768636.651	m
Coord. Y	4147900.166	m
Altitud	12.435	msnm
Precisión (h;v)	0.019 ; 0.020	m
Equipo	Trimble R4	
Altura antena	2	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	X
Suave (5 a 12%)	
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

—— —Sedimentos dendríticos- —— ·
—— —Regosoles / cambisoles- —— ·
—— —— —— -(REDIAM)— —— —— ·

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	
Ausente	X

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	
Húmedo	X
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	# 37, 38 y 39	Objetivo	Suelo tipo
	# 40, 41 y 42		Algodón tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	X
Sol y nubes	
Nublado	
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	
Cultivo	Algodón
Erial	
Extracción o vertido	
Otro	

MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	32.6 °C	Temp T2	35.7 °C
Acimut solar	84 °	Altura solar	72 °

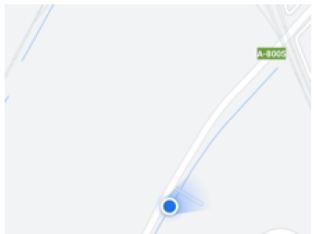
IMPACTOS CERCANOS

Poblados	X
Carreteras	X
Depósitos de residuos	
Industria	X
Otros	Cables

ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	
Color	
Vegetación circundante	

CROQUIS



OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

Tomamos firmas de cultivos__ __ __ __
Distrito -> 4109107 __ __ __ __ __ __
A 212m al Noroeste del planificado__ __
1.5 Kg de peso de muestra __ __ __ __
— — — — — — — — — — — —
— — — — — — — — — — — —

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
senescyt
INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR
TEPRO CONSULTORES AGRÍCOLAS, S.L.

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Comunidad	Andalucía
Provincia	Sevilla
Municipio	Alcalá de Guadaíra
Sector	Arroyo de Ranilla

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	SEV – S – 060
Fecha	01/07/2021
Hora	11:39 AM
Fotografías	Sev (117 a 120)

POSICIONAMIENTO (UTM, WGS84 Z29N)

Coord. X	771764.791	m
Coord. Y	4140002.337	m
Altitud	14.828	msnm
Precisión (h;v)	0.021 ; 0.024	m
Equipo	Trimble R4	
Altura antena	2	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	X
Suave (5 a 12%)	
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

- —Sedimentos dendríticos-
- —Regosoles / cambisoles-
- -(REDIAM)

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	X
Ausente	

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	X
Húmedo	
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	# 43 y 44	Objetivo	Suelo tipo
	# 45 y 46		Vegetación tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	X
Sol y nubes	
Nublado	
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	X
Cultivo	
Erial	
Extracción o vertido	
Otro	

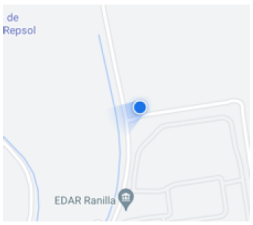
MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	32.3 °C	Temp T2	28.9 °C
Acimut solar	92 °	Altura solar	81 °

IMPACTOS CERCANOS

Poblados	
Carreteras	
Depósitos de residuos	X
Industria	X
Otros	

CROQUIS



ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	
Color	
Vegetación circundante	

OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

Sector altamente con depósitos de basura
Distrito -> 4100404
A 768m al Suroeste del planificado
1.25 Kg de peso de muestra

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Comunidad	Andalucía
Provincia	Sevilla
Municipio	Las Cabezas de San Juan
Sector	Tomates del Sur

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	SEV – S – 062
Fecha	01/07/2021
Hora	16:02 PM
Fotografías	Sev (135 a 145)

POSICIONAMIENTO (UTM, WGS84 Z29N)

Coord. X	772232.323	m
Coord. Y	4100732.806	m
Altitud	15.683	msnm
Precisión (h;v)	0.176 ; 0.215	m
Equipo	Trimble R4	
Altura antena	2	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	X
Suave (5 a 12%)	
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

—Calcarenitas, margas, calizas— · — —Regosoles / cambisoles· — · — — — -(REDIAM)— — — ·

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	X
Ausente	

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	
Húmedo	X
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	# 56, 58 y 59	Objetivo	Suelo tipo
	# 60 y 61		Almendro tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	X
Sol y nubes	
Nublado	
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	
Cultivo	Almendro
Erial	
Extracción o vertido	
Otro	

MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	54.2 °C	Temp T2	48.5 °C
Acimut solar	236 °	Altura solar	86 °

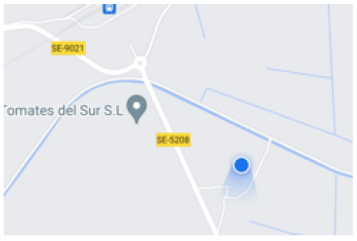
IMPACTOS CERCANOS

Poblados	X
Carreteras	
Depósitos de residuos	
Industria	
Otros	

ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	
Color	
Vegetación circundante	

CROQUIS



OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

Último de vegetación 61 tiene manchas en la hoja (Firma) _ _ _ _ _ _ _ _
A 6m al Suroeste del planificado _ _ _
Distrito -> 4102002 _ _ _ _ _ _ _
SEV – S – 064 fuera de trayecto _ _ _
1.5 Kg de peso de muestra _ _ _ _
No hay fotos #142 a 144

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Comunidad	Andalucía
Provincia	Sevilla
Municipio	Las Cabezas de San Juan
Sector	Tomates del Sur

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	SEV – S – 063
Fecha	01/07/2021
Hora	16:57 PM
Fotografías	Sev (151 a 155)

POSICIONAMIENTO

(UTM, WGS84 Z29N)

Coord. X	772223.712	m
Coord. Y	4100423.307	m
Altitud	18.128	msnm
Precisión (h;v)	0.055 ; 0.055	m
Equipo	Trimble R4	
Altura antena	2	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	X
Suave (5 a 12%)	
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

—Calcarenitas, margas, calizas—
—Regosoles / cambisoles—
-(REDIAM)-

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	
Ausente	X

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	X
Húmedo	
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	# 67, 68 y 69	Objetivo	Suelo tipo
	#		tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	X
Sol y nubes	
Nublado	
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	
Cultivo	
Erial	
Extracción o vertido	
Otro	Suelo desnudo

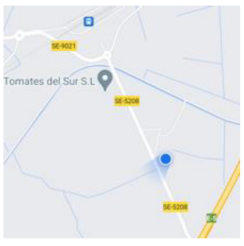
MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	46.1 °C	Temp T2	45.3 °C
Acimut solar	248 °	Altura solar	79 °

IMPACTOS CERCANOS

Poblados	X
Carreteras	
Depósitos de residuos	
Industria	
Otros	

CROQUIS



ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	
Color	
Vegetación circundante	

OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

A 272m al Noroeste del planificado
Distrito -> 4102002
Cultivo de tipo herbáceo, actualmente sin riego
1.45 Kg de peso de muestra

POLITÉCNICA — UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID — senescyt — INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR — TEPRO CONSULTORES AGRÍCOLAS, S.L.

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Comunidad	Andalucía
Provincia	Sevilla
Municipio	La Puebla del Río
Sector	Los Olivillos

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	SEV – S – 065
Fecha	01/07/2021
Hora	13:11 PM
Fotografías	Sev (125 a 128)

POSICIONAMIENTO

(UTM, WGS84 Z29N)

Coord. X	759327.844	m
Coord. Y	4119952.281	m
Altitud	2.674	msnm
Precisión (h;v)	0.021 ; 0.028	m
Equipo	Trimble R4	
Altura antena	2	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	X
Suave (5 a 12%)	
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

—Sedimentos dentríticos-
Solonchaks
-(REDIAM)

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	
Ausente	X

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	X
Húmedo	
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	# 50 a 52	Objetivo	Suelo tipo
	# 53 y 54		Herbáceo tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	X
Sol y nubes	
Nublado	
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	
Cultivo	
Erial	X
Extracción o vertido	
Otro	

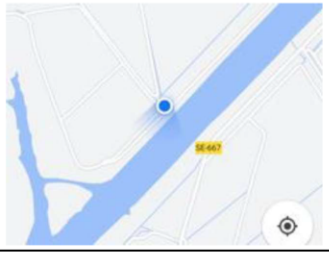
MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	39.4 °C	Temp T2	39.6 °C
Acimut solar	116 °	Altura solar	79 °

IMPACTOS CERCANOS

Poblados	X
Carreteras	X
Depósitos de residuos	
Industria	
Otros	Cables

CROQUIS



ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	
Color	
Vegetación circundante	

OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

0.8 Kg de peso de muestra
Cultivo de arroz, actualmente parcela sin riego
A 435m al Sureste del planificado
Distrito -> 4107901

POLITÉCNICA — UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
senescyt — Secretaría Nacional de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación
INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR
TEPRO — CONSULTORES AGRÍCOLAS, S.L.

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Comunidad	Andalucía
Provincia	Sevilla
Municipio	La Puebla del Río
Sector	Acequia San Basilio

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	TEPRO – S – 001
Fecha	30/06/2021
Hora	14:50 PM
Fotografías	Sev (69 a 79)

POSICIONAMIENTO (UTM, WGS84 Z29N)

Coord. X	755288.498	m
Coord. Y	4113666.944	m
Altitud	2.669	msnm
Precisión (h;v)	0.026 ; 0.039	m
Equipo	Trimble R4	
Altura antena	2	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	X
Suave (5 a 12%)	
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

— —Sedimentos dendríticos- — ·
— — — Solonchaks— — — ·
— — — -(REDIAM)— — — ·

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	
Ausente	X

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	X
Húmedo	
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	# 7 y 10	Objetivo	Suelo tipo
	#		tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	X
Sol y nubes	
Nublado	
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	X
Herbácea	X
Cultivo	
Erial	
Extracción o vertido	
Otro	

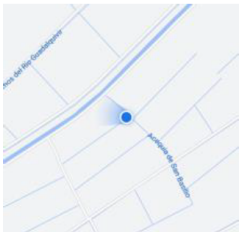
MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	44.3 °C	Temp T2	48.6 °C
Acimut solar	186 °	Altura solar	90 °

IMPACTOS CERCANOS

Poblados	
Carreteras	
Depósitos de residuos	
Industria	
Otros	

CROQUIS



ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	
Color	
Vegetación circundante	

OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

Se cultiva arroz, actualmente parcela sin riego
Área de interés de TEPRO
Distrito -> 4107901
No existen fotos 74 a 78
0.95 Kg de peso de muestra

POLITÉCNICA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
senescyt Secretaría Nacional de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación
INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR
TEPRO CONSULTORES AGRÍCOLAS, S.L.

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Comunidad	Andalucía
Provincia	Sevilla
Municipio	Las Cabezas de San Juan
Sector	Tomates del Sur

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	TEPRO – C – 004
Fecha	01/07/2021
Hora	16:17 PM
Fotografías	Sev (146 a 150)

POSICIONAMIENTO (UTM, WGS84 Z29N)

Coord. X	770109.653	m
Coord. Y	4101218.657	m
Altitud	3.729	msnm
Precisión (h;v)	0.020 ; 0.025	m
Equipo	Trimble R4	
Altura antena	2	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	X
Suave (5 a 12%)	
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

—— —Sedimentos dendríticos- —— ·
—— —— —— ·Solonchaks—— —— —— ·
—— —— —— -(REDIAM)—— —— —— ·

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	X
Ausente	

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	X
Húmedo	
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	# 65 y 66	Objetivo	Suelo tipo
	# 62, 63 y 64		Almendro tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	X
Sol y nubes	
Nublado	
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	
Cultivo	Almendro
Erial	
Extracción o vertido	
Otro	

MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	43.2 °C	Temp T2	46.3 °C
Acimut solar	248 °	Altura solar	90 °

IMPACTOS CERCANOS

Poblados	
Carreteras	X
Depósitos de residuos	
Industria	
Otros	

CROQUIS

ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	N/A
Color	Verde
Vegetación circundante	Herbácea

OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

Añadimos muestra de suelo para análisis (+4S) __ __ __ __ __ __ __ __ __ __
Distrito -> 4102002 __ __ __ __ __ __
Tierras de TEPRO que maneja __ __ __
1.3 Kg de peso de muestra __ __ __ __
__ __ __ __ __ __ __ __ __ __ __

POLITÉCNICA — UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID — senescyt — INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR — TEPRO CONSULTORES AGRÍCOLAS, S.L.

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Provincia	Orellana
Cantón	La Joya de los Sachas
Parroquia	Unión Milagreña
Sector	Unión Milagreña

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	EC - S - 01
Fecha	15/09/2022
Hora	13:00 AM
Fotografías	Ec (1 a 5)

POSICIONAMIENTO (UTM, WGS84 Z18S)

Coord. X	299264,959	m
Coord. Y	9960256,277	m
Altitud	272,321	msnm
Precisión (h;v)		m
Equipo	Mobile Mapper	
Altura antena	0	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	X
Suave (5 a 12%)	
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

Piedemonte con cobertura de ceniza (IEE)

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	X
NO	

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	
Ausente	X

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	
Húmedo	X
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	#	Objetivo	tipo
	#		tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	
Sol y nubes	X
Nublado	
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	X
Cultivo	
Erial	
Extracción o vertido	
Otro	

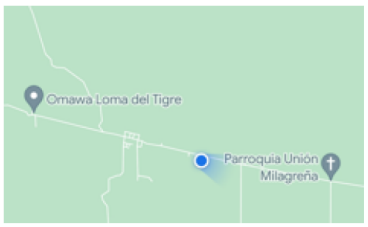
MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	25.5 °C	Temp T2	26.7 °C
Acimut solar	281.53 °	Altura solar	75.44 °

IMPACTOS CERCANOS

Poblados	X
Carreteras	
Depósitos de residuos	
Industria	
Otros	

CROQUIS



ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	
Color	Verde
Vegetación circundante	Cacao

OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

Actividad petrolera

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Provincia	Orellana
Cantón	La Joya de los Sachas
Parroquia	Unión Milagreña
Sector	Unión Milagreña

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	EC-C-02
Fecha	15/09/2022
Hora	13:19 PM
Fotografías	Ec (6 a 12)

POSICIONAMIENTO

(UTM, WGS84 Z18S)

Coord. X	299253,431	m
Coord. Y	9960312,59479	m
Altitud	271.442	msnm
Precisión (h;v)		m
Equipo	Mobile Mapper	
Altura antena	0	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	x
Suave (5 a 12%)	
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

Piedemonte con cobertura de ceniza (IEE)

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	
Ausente	X

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	
Húmedo	X
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	#	Objetivo	tipo
	#		tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	
Sol y nubes	X
Nublado	
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	
Cultivo	Cacao
Erial	
Extracción o vertido	
Otro	

MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	42.3 °C	Temp T2	39.6 °C
Acimut solar	278.63 °	Altura solar	70.52 °

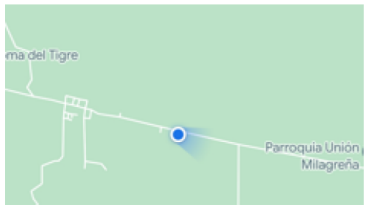
IMPACTOS CERCANOS

Poblados	X
Carreteras	X
Depósitos de residuos	
Industria	
Otros	

ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	Si
Color	Verde
Vegetación circundante	Hojarasca

CROQUIS



OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

Actividad petrolera

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

senescyt

INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Provincia	Orellana
Cantón	La Joya de los Sachas
Parroquia	La Joya de los Sachas
Sector	Sacha Norte 1

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	EC - S - 03
Fecha	15/09/2022
Hora	14:20 PM
Fotografías	Ec (13 a 17)

POSICIONAMIENTO

(UTM, WGS84 Z18S

Coord. X	293781,844	m
Coord. Y	9965454,897	m
Altitud	283.003	msnm
Precisión (h;v)		m
Equipo	Mobile Mapper	
Altura antena	0	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	X
Suave (5 a 12%)	
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

Piedemonte con cobertura de ceniza (IEE)

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	X
NO	

PEDREGOSIDAD

Abundante	X
Ocasional	
Ausente	

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	
Húmedo	X
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	#	Objetivo	tipo
	#		tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	
Sol y nubes	X
Nublado	
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	X
Cultivo	
Erial	
Extracción o vertido	
Otro	

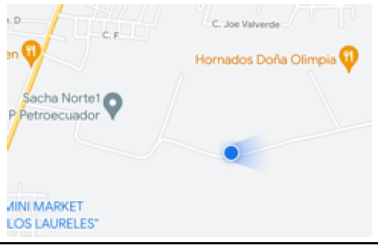
MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	34.2 °C	Temp T2	32.5 °C
Acimut solar	275.0 °	Altura solar	55.61 °

IMPACTOS CERCANOS

Poblados	
Carreteras	
Depósitos de residuos	
Industria	
Otros	Petrolera

CROQUIS



ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	
Color	
Vegetación circundante	

OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

Actividad petrolera

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

senescyt

INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Provincia	Orellana
Cantón	La Joya de los Sachas
Parroquia	San Carlos
Sector	La Cordillera

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	EC - S - 04
Fecha	15/09/2022
Hora	15:00 PM
Fotografías	Ec (18 a 22)

POSICIONAMIENTO

(UTM, WGS84 Z18S

Coord. X	292406,045	m
Coord. Y	9955628,408	m
Altitud	275.575	msnm
Precisión (h;v)		m
Equipo	Mobile Mapper	
Altura antena	0	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	X
Suave (5 a 12%)	
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

Piedemonte con cobertura de ceniza (IEE)

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	X
Ausente	

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	
Húmedo	X
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	#	Objetivo	tipo
	#		tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	
Sol y nubes	X
Nublado	
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	
Cultivo	Cacao
Erial	
Extracción o vertido	
Otro	

MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	35.9 °C	Temp T2	33.0 °C
Acimut solar	273.98 °	Altura solar	45.64 °

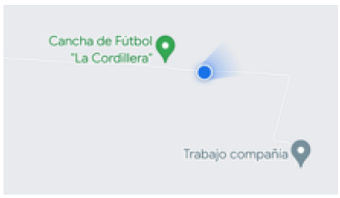
IMPACTOS CERCANOS

Poblados	X
Carreteras	X
Depósitos de residuos	
Industria	
Otros	Cable Subterráneo

ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	No
Color	Verde
Vegetación circundante	Cacao

CROQUIS



OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

Actividad petrolera

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

senescyt

INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Provincia	Orellana
Cantón	La Joya de los Sachas
Parroquia	San Carlos
Sector	La Cordillera

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	EC - S - 05
Fecha	15/09/2022
Hora	15:29 PM
Fotografías	Ec (23 a 29)

POSICIONAMIENTO

(UTM, WGS84 Z18S

Coord. X	291848,915	m
Coord. Y	9956479,690	m
Altitud	272.982	msnm
Precisión (h;v)		m
Equipo	Mobile Mapper	
Altura antena	0	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	X
Suave (5 a 12%)	
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

Piedemonte con cobertura de ceniza (IEE)

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	X
Ausente	

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	
Húmedo	X
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	#	Objetivo	tipo
	#		tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	
Sol y nubes	X
Nublado	
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	
Cultivo	Maíz
Erial	
Extracción o vertido	
Otro	

MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	34.0 °C	Temp T2	31.8 °C
Acimut solar	273.49 °	Altura solar	38.15 °

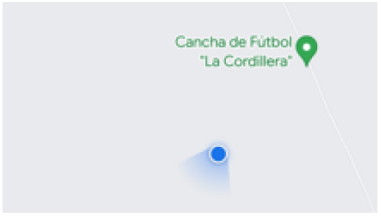
IMPACTOS CERCANOS

Poblados	
Carreteras	X
Depósitos de residuos	
Industria	
Otros	

ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	Ninguno
Color	
Vegetación circundante	

CROQUIS



OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

Actividad petrolera

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

senescyt

INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Provincia	Orellana
Cantón	La Joya de los Sachas
Parroquia	San Carlos
Sector	Producto San Carlos

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	EC - S - 06
Fecha	15/09/2022
Hora	16:05 PM
Fotografías	Ec (30 a 34)

POSICIONAMIENTO

(UTM, WGS84 Z18S

Coord. X	290626,097	m
Coord. Y	9959214,910	m
Altitud	283.003	msnm
Precisión (h;v)		m
Equipo	Mobile Mapper	
Altura antena	0	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	X
Suave (5 a 12%)	
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

Piedemonte con cobertura de ceniza (IEE)

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	X
NO	

PEDREGOSIDAD

Abundante	X
Ocasional	
Ausente	

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	
Húmedo	X
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	#	Objetivo	tipo
	#		tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	
Sol y nubes	X
Nublado	
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	X
Cultivo	
Erial	
Extracción o vertido	
Otro	

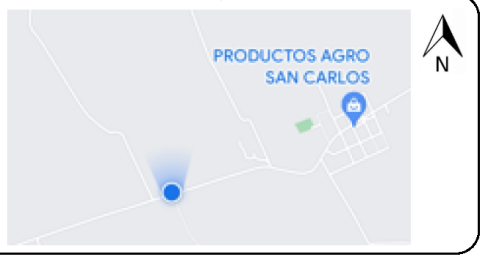
MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	39.3 °C	Temp T2	36.0 °C
Acimut solar	273.11 °	Altura solar	29.42 °

IMPACTOS CERCANOS

Poblados	
Carreteras	X
Depósitos de residuos	
Industria	
Otros	Petrolera

CROQUIS



ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	
Color	
Vegetación circundante	

OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

Actividad petrolera

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Provincia	Orellana
Cantón	La Joya de los Sachas
Parroquia	San Carlos
Sector	Eugenio Espejo

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	EC - C - 07
Fecha	15/09/2022
Hora	16:41 PM
Fotografías	Ec (35 a 38)

POSICIONAMIENTO

(UTM, WGS84 Z18S

Coord. X	284379,837	m
Coord. Y	9960995,014	m
Altitud	280.995	msnm
Precisión (h;v)		m
Equipo	Mobile Mapper	
Altura antena	0	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	
Suave (5 a 12%)	
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

Piedemonte con cobertura de ceniza (IEE)

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	X
NO	

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	X
Ausente	

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	
Húmedo	X
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	#	Objetivo	tipo
	#		tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	
Sol y nubes	
Nublado	X
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	
Cultivo	Cacao
Erial	
Extracción o vertido	
Otro	

MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	34.8 °C	Temp T2	33.0 °C
Acimut solar	272.84 °	Altura solar	20.68 °

IMPACTOS CERCANOS

Poblados	X
Carreteras	X
Depósitos de residuos	
Industria	
Otros	Petrolera

ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	Si
Color	Verde
Vegetación circundante	Hojarazca

CROQUIS

OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

Actividad petrolera

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Provincia	Orellana
Cantón	La Joya de los Sachas
Parroquia	La Joya de los Sachas
Sector	Criavesc

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	EC - C - 08
Fecha	15/09/2022
Hora	17:34 PM
Fotografías	Ec (39 a 44)

POSICIONAMIENTO

(UTM, WGS84 Z18S

Coord. X	289983,268	m
Coord. Y	9968299,125	m
Altitud	291.843	msnm
Precisión (h;v)		m
Equipo	Mobile Mapper	
Altura antena	0	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	X
Suave (5 a 12%)	
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

Piedemonte con cobertura de ceniza (IEE)

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	
Ausente	X

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	
Húmedo	
Mojado	X

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	#	Objetivo	tipo
	#		tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	
Sol y nubes	
Nublado	X
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	
Cultivo	Maíz y Cacao
Erial	
Extracción o vertido	
Otro	

MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	31.8 °C	Temp T2	31.7 °C
Acimut solar	272.6 °	Altura solar	7.19 °

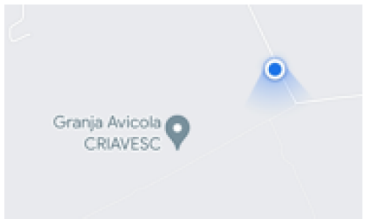
IMPACTOS CERCANOS

Poblados	X
Carreteras	
Depósitos de residuos	X
Industria	
Otros	

ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	No
Color	Verde
Vegetación circundante	Hojarazca

CROQUIS



OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

Actividad petrolera

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

senescyt

INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Provincia	Orellana
Cantón	La Joya de los Sachas
Parroquia	La Joya de los Sachas
Sector	Criavesc

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	EC - C - 09
Fecha	15/09/2022
Hora	17:44 PM
Fotografías	Ec (44 a 48)

POSICIONAMIENTO

(UTM, WGS84 Z18S

Coord. X	290003,043	m
Coord. Y	9968262,714	m
Altitud	285.754	msnm
Precisión (h;v)		m
Equipo	Mobile Mapper	
Altura antena	0	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	X
Suave (5 a 12%)	
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

Piedemonte con cobertura de ceniza (IEE)

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	
Ausente	X

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	
Húmedo	
Mojado	X

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	#	Objetivo	tipo
	#		tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	
Sol y nubes	
Nublado	X
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	
Cultivo	Palma
Erial	
Extracción o vertido	
Otro	

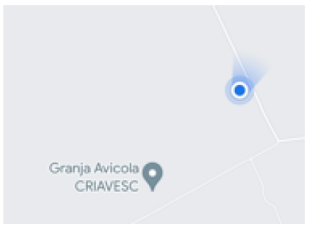
MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	31.9 °C	Temp T2	32.8 °C
Acimut solar	272.58 °	Altura solar	4.44 °

IMPACTOS CERCANOS

Poblados	
Carreteras	X
Depósitos de residuos	X
Industria	
Otros	

CROQUIS



ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	Si
Color	Verde
Vegetación circundante	Herbácea

OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

Actividad petrolera

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Provincia	Orellana
Cantón	La Joya de los Sachas
Parroquia	Lago San Pedro
Sector	San Pedro

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	EC - S - 010
Fecha	16/09/2022
Hora	09:09 AM
Fotografías	Ec (49 a 53)

POSICIONAMIENTO

(UTM, WGS84 Z18S

Coord. X	290922,650	m
Coord. Y	9971983,577	m
Altitud	200.215	msnm
Precisión (h;v)		m
Equipo	Mobile Mapper	
Altura antena	0	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	
Suave (5 a 12%)	X
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

Piedemonte con cobertura de ceniza (IEE)

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	
Ausente	X

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	
Húmedo	
Mojado	X

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	#	Objetivo	tipo
	#		tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	
Sol y nubes	
Nublado	
Lluvioso	X

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	
Cultivo	Maíz y Cacao
Erial	
Extracción o vertido	
Otro	

MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	24.3 °C	Temp T2	23.6 °C
Acimut solar	86.36 °	Altura solar	46.78 °

IMPACTOS CERCANOS

Poblados	X
Carreteras	X
Depósitos de residuos	
Industria	
Otros	

ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	No
Color	
Vegetación circundante	

CROQUIS

OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

Actividad petrolera

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

senescyt

INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Provincia	Orellana
Cantón	La Joya de los Sachas
Parroquia	Lago San Pedro
Sector	Power Sacha

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	EC - C - 011
Fecha	16/09/2022
Hora	11:12 AM
Fotografías	Ec (54 a 57)

POSICIONAMIENTO

(UTM, WGS84 Z18S

Coord. X	293423,469	m
Coord. Y	9973367,177	m
Altitud	283.656	msnm
Precisión (h;v)		m
Equipo	Mobile Mapper	
Altura antena	0	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	
Suave (5 a 12%)	
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

Piedemonte con cobertura de ceniza (IEE)

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	
Ausente	X

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	
Húmedo	
Mojado	X

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	#	Objetivo	tipo
	#		tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	
Sol y nubes	
Nublado	
Lluvioso	X

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	
Cultivo	Maiz
Erial	
Extracción o vertido	
Otro	

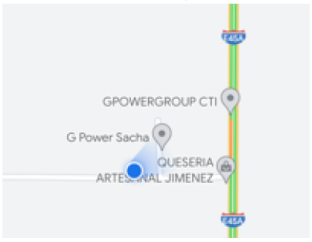
MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	27.8 °C	Temp T2	28.9 °C
Acimut solar	79.03 °	Altura solar	76.62 °

IMPACTOS CERCANOS

Poblados	
Carreteras	X
Depósitos de residuos	
Industria	
Otros	Petrolera

CROQUIS



ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	No
Color	Verde
Vegetación circundante	Ninguno

OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

Actividad petrolera

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

senescyt

INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Provincia	Orellana
Cantón	La Joya de los Sachas
Parroquia	Enokanqui
Sector	Enokanqui

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	EC - S - 012
Fecha	16/09/2022
Hora	11:48 AM
Fotografías	Ec (58 a 61)

POSICIONAMIENTO

(UTM, WGS84 Z18S

Coord. X	297014,050	m
Coord. Y	9976640,824	m
Altitud	284.089	msnm
Precisión (h;v)		m
Equipo	Mobile Mapper	
Altura antena	0	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	X
Suave (5 a 12%)	
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

Piedemonte con cobertura de ceniza (IEE)

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	
Ausente	X

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	
Húmedo	
Mojado	X

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	#	Objetivo	tipo
	#		tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	
Sol y nubes	
Nublado	X
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	
Cultivo	
Erial	
Extracción o vertido	
Otro	Preparación cultivo

MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	27.7 °C	Temp T2	28.7 °C
Acimut solar	55.26 °	Altura solar	85.57 °

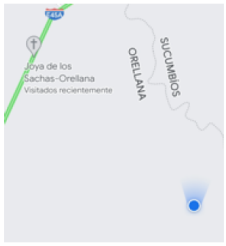
IMPACTOS CERCANOS

Poblados	X
Carreteras	X
Depósitos de residuos	
Industria	
Otros	

ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	
Color	
Vegetación circundante	

CROQUIS



OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

Actividad petrolera

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

senescyt

INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Provincia	Orellana
Cantón	La Joya de los Sachas
Parroquia	Enokanqui
Sector	Hospital Civil

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	EC - C - 13
Fecha	16/09/2022
Hora	12:26 PM
Fotografías	Ec (62 a 66)

POSICIONAMIENTO

(UTM, WGS84 Z18S

Coord. X	298685,756	m
Coord. Y	9978854,234	m
Altitud	283.003	msnm
Precisión (h;v)		m
Equipo	Mobile Mapper	
Altura antena	0	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	
Suave (5 a 12%)	X
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

Piedemonte con cobertura de ceniza (IEE)

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	
Ausente	X

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	
Húmedo	
Mojado	X

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	#	Objetivo	tipo
	#		tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	
Sol y nubes	X
Nublado	
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	
Cultivo	Palma
Erial	
Extracción o vertido	
Otro	

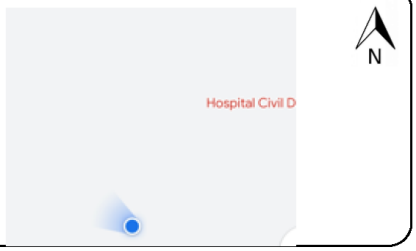
MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	27.2 °C	Temp T2	26.8 °C
Acimut solar	293.22 °	Altura solar	83.62 °

IMPACTOS CERCANOS

Poblados	
Carreteras	X
Depósitos de residuos	
Industria	
Otros	

CROQUIS



ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	Si
Color	Verde/ Amarillo
Vegetación circundante	Herbáceo

OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

Actividad petrolera

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Provincia	Sucumbíos
Cantón	Shushufindi
Parroquia	San Pedro de los Cofanes
Sector	Hospital Civil

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	EC - S - 014
Fecha	16/09/2022
Hora	12:38 PM
Fotografías	Ec (67 a 72)

POSICIONAMIENTO

(UTM, WGS84 Z18S

Coord. X	298650,533	m
Coord. Y	9978847,330	m
Altitud	296.497	msnm
Precisión (h;v)		m
Equipo	Mobile Mapper	
Altura antena	0	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	X
Suave (5 a 12%)	
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

Piedemonte con cobertura de ceniza (IEE)

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	X
Ausente	

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	
Húmedo	X
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	#	Objetivo	tipo
	#		tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	
Sol y nubes	X
Nublado	
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	
Cultivo	
Erial	X
Extracción o vertido	
Otro	Preparación cultivo

MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	28.4 °C	Temp T2	29.5 °C
Acimut solar	285.04 °	Altura solar	80.31 °

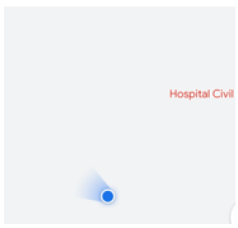
IMPACTOS CERCANOS

Poblados	
Carreteras	X
Depósitos de residuos	
Industria	
Otros	

ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	
Color	
Vegetación circundante	

CROQUIS



OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

Error 1° foto

Actividad petrolera

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

senescyt

INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Provincia	Sucumbíos
Cantón	Shushufindi
Parroquia	San Pedro de los Cofanes
Sector	Jivino Verde

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	EC - S - 015
Fecha	16/09/2022
Hora	13:05 PM
Fotografías	Ec (73 a 77)

POSICIONAMIENTO

(UTM, WGS84 Z18S

Coord. X	296802,962	m
Coord. Y	9979373,591	m
Altitud	292.951	msnm
Precisión (h;v)		m
Equipo	Mobile Mapper	
Altura antena	0	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	X
Suave (5 a 12%)	
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

Piedemonte con cobertura de ceniza (IEE)

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	
Ausente	X

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	
Húmedo	X
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	#	Objetivo	tipo
	#		tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	
Sol y nubes	X
Nublado	
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	X
Cultivo	
Erial	
Extracción o vertido	
Otro	

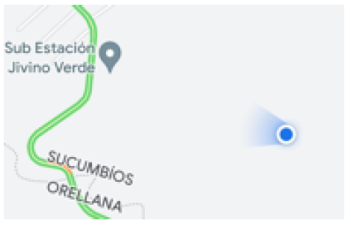
MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	29.5 °C	Temp T2	30.3 °C
Acimut solar	279.18 °	Altura solar	74.19 °

IMPACTOS CERCANOS

Poblados	
Carreteras	X
Depósitos de residuos	
Industria	
Otros	Petrolera

CROQUIS



ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	No
Color	Verde
Vegetación circundante	

OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

Actividad petrolera

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Provincia	Sucumbíos
Cantón	Shushufindi
Parroquia	San Pedro de los Cofanes
Sector	Jivino Verde

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	EC - C - 016
Fecha	16/09/2022
Hora	13:13 PM
Fotografías	Ec (78 a 82)

POSICIONAMIENTO

(UTM, WGS84 Z18S

Coord. X	296808,005	m
Coord. Y	9979359,171	m
Altitud	293.498	msnm
Precisión (h;v)		m
Equipo	Mobile Mapper	
Altura antena	0	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	X
Suave (5 a 12%)	
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

Piedemonte con cobertura de ceniza (IEE)

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	
Ausente	X

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	
Húmedo	X
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	#	Objetivo	tipo
	#		tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	
Sol y nubes	X
Nublado	
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	
Cultivo	Cacao
Erial	
Extracción o vertido	
Otro	

MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	29.9 °C	Temp T2	30.2°C
Acimut solar	278.16 °	Altura solar	72.21 °

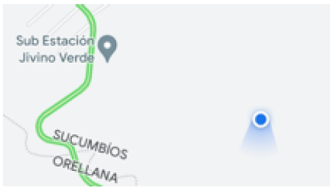
IMPACTOS CERCANOS

Poblados	X
Carreteras	X
Depósitos de residuos	
Industria	
Otros	Petrolera

ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	Si
Color	Verde Rojizo
Vegetación circundante	Herbáceo

CROQUIS



OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

Actividad petrolera

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

senescyt

INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Provincia	Sucumbíos
Cantón	Shushufindi
Parroquia	San Pedro de los Cofanes
Sector	Jivino Verde

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	EC - S - 017
Fecha	16/09/2022
Hora	13:49 PM
Fotografías	Ec (83 a 87)

POSICIONAMIENTO

(UTM, WGS84 Z18S

Coord. X	295664,741	m
Coord. Y	9982751,464	m
Altitud	299.621	msnm
Precisión (h;v)		m
Equipo	Mobile Mapper	
Altura antena	0	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	X
Suave (5 a 12%)	
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

Piedemonte con cobertura de ceniza (IEE)

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	
Ausente	X

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	
Húmedo	X
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	#	Objetivo	tipo
	#		tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	
Sol y nubes	X
Nublado	
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	X
Cultivo	
Erial	
Extracción o vertido	
Otro	

MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	31.5 °C	Temp T2	32.9 °C
Acimut solar	275.48 °	Altura solar	63.27 °

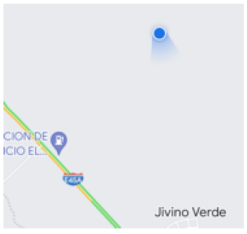
IMPACTOS CERCANOS

Poblados	
Carreteras	
Depósitos de residuos	
Industria	
Otros	

ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	
Color	
Vegetación circundante	

CROQUIS



OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

Actividad petrolera

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

senescyt

INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Provincia	Sucumbios
Cantón	Shushufindi
Parroquia	San Pedro de los Cofanes
Sector	Jivino Verde

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	EC – C - 018
Fecha	16/09/2022
Hora	14:03 PM
Fotografías	Ec (88 a 92)

POSICIONAMIENTO

(UTM, WGS84 Z18S

Coord. X	295637,190	m
Coord. Y	9982708,443	m
Altitud	294.731	msnm
Precisión (h;v)		m
Equipo	Mobile Mapper	
Altura antena	0	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	
Suave (5 a 12%)	X
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

Piedemonte con cobertura de ceniza (IEE)

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	
Ausente	X

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	
Húmedo	X
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	#	Objetivo	tipo
	#		tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	
Sol y nubes	X
Nublado	
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	Teca
Arbustiva	
Herbácea	
Cultivo	
Erial	
Extracción o vertido	
Otro	

MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	29.3 °C	Temp T2	29.5 °C
Acimut solar	274.87	Altura solar	59.79 °

IMPACTOS CERCANOS

Poblados	
Carreteras	
Depósitos de residuos	
Industria	
Otros	Petrolera

ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	Si
Color	Verde
Vegetación circundante	Herbácea

CROQUIS

OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

Actividad petrolera

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

senescyt

INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Provincia	Sucumbios
Cantón	Shushufindi
Parroquia	San Pedro de los Cofanes
Sector	Dygoil

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	EC - S - 019
Fecha	16/09/2022
Hora	14:44 PM
Fotografías	Ec (93 a 97)

POSICIONAMIENTO

(UTM, WGS84 Z18S

Coord. X	299141,950	m
Coord. Y	9983765,621	m
Altitud	304.141	msnm
Precisión (h;v)		m
Equipo	Mobile Mapper	
Altura antena	0	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	X
Suave (5 a 12%)	
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

Piedemonte con cobertura de ceniza (IEE)

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	
Ausente	X

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	
Húmedo	X
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	#	Objetivo	tipo
	#		tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	
Sol y nubes	X
Nublado	
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	
Cultivo	Maiz
Erial	
Extracción o vertido	
Otro	

MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	38.1 °C	Temp T2	34.4 °C
Acimut solar	273.72 °	Altura solar	49.56 °

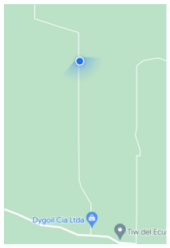
IMPACTOS CERCANOS

Poblados	
Carreteras	X
Depósitos de residuos	
Industria	
Otros	

ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	No
Color	Verde
Vegetación circundante	Herbácea

CROQUIS



OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

Actividad petrolera

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Provincia	Sucumbios
Cantón	Shushufindi
Parroquia	Siete de Julio
Sector	Dygoil

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	EC - S - 020
Fecha	16/09/2022
Hora	15:05 PM
Fotografías	Ec (98 a 102)

POSICIONAMIENTO

(UTM, WGS84 Z18S

Coord. X	300194,247	m
Coord. Y	9984148,925	m
Altitud	304.372	msnm
Precisión (h;v)		m
Equipo	Mobile Mapper	
Altura antena	0	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	X
Suave (5 a 12%)	
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

Piedemonte con cobertura de ceniza (IEE)

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	
Ausente	X

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	
Húmedo	X
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	#	Objetivo	tipo
	#		tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	
Sol y nubes	X
Nublado	
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	
Cultivo	Palma
Erial	
Extracción o vertido	
Otro	

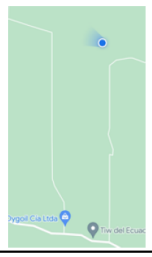
MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	33.5 °C	Temp T2	34.6 °C
Acimut solar	273.34 °	Altura solar	44.32 °

IMPACTOS CERCANOS

Poblados	
Carreteras	
Depósitos de residuos	
Industria	
Otros	

CROQUIS



ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	No
Color	
Vegetación circundante	

OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

Actividad petrolera

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

senescyt

INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Provincia	Sucumbios
Cantón	Shushufindi
Parroquia	Siete de Julio
Sector	Siete de Julio

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	EC - C - 021
Fecha	16/09/2022
Hora	16:03 PM
Fotografías	Ec (103 a 107)

POSICIONAMIENTO (UTM, WGS84 Z18S)

Coord. X	303229,842	m
Coord. Y	9983672,713	m
Altitud	293.926	msnm
Precisión (h;v)		m
Equipo	Mobile Mapper	
Altura antena	0	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	X
Suave (5 a 12%)	
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

Piedemonte con cobertura de ceniza (IEE)

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	
Ausente	X

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	
Húmedo	X
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	#	Objetivo	tipo
	#		tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	
Sol y nubes	X
Nublado	
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	
Cultivo	Cacao
Erial	
Extracción o vertido	
Otro	

MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	31.1 °C	Temp T2	30.3 °C
Acimut solar	272.68 °	Altura solar	29.84 °

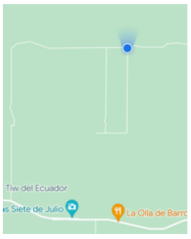
IMPACTOS CERCANOS

Poblados	
Carreteras	X
Depósitos de residuos	
Industria	
Otros	

ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	Si
Color	Verde Rojizo
Vegetación circundante	Hojarazca

CROQUIS



OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

Actividad petrolera

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

senescyt

INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Provincia	Sucumbios
Cantón	Shushufindi
Parroquia	Siete de Julio
Sector	La Olla de Barro

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	EC - S - 022
Fecha	16/09/2022
Hora	16:42 PM
Fotografías	Ec (108 a 111)

POSICIONAMIENTO

(UTM, WGS84 Z18S

Coord. X	305870,223	m
Coord. Y	9978592,447	m
Altitud	281.499	msnm
Precisión (h;v)		m
Equipo	Mobile Mapper	
Altura antena	0	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	X
Suave (5 a 12%)	
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

Piedemonte con cobertura de ceniza (IEE)

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	
Ausente	X

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	
Húmedo	X
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	#	Objetivo	tipo
	#		tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	
Sol y nubes	
Nublado	X
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	
Cultivo	Cacao
Erial	
Extracción o vertido	
Otro	

MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	29.0 °C	Temp T2	28.8 °C
Acimut solar	272.42 °	Altura solar	20.1 °

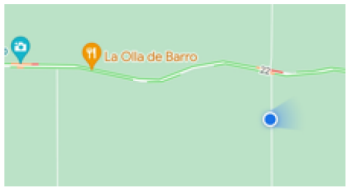
IMPACTOS CERCANOS

Poblados	
Carreteras	X
Depósitos de residuos	
Industria	
Otros	

ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	No
Color	Verde Rojo
Vegetación circundante	Herbácea

CROQUIS



OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

Actividad petrolera

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

senescyt

INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Provincia	Sucumbíos
Cantón	Shushufindi
Parroquia	Siete de Julio
Sector	Siete de Julio

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	EC - C - 023
Fecha	16/09/2022
Hora	17:03 PM
Fotografías	Ec (112 a 117)

POSICIONAMIENTO

(UTM, WGS84 Z18S

Coord. X	305888,492	m
Coord. Y	9975631,734	m
Altitud	283.922	msnm
Precisión (h;v)		m
Equipo	Mobile Mapper	
Altura antena	0	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	X
Suave (5 a 12%)	
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

Piedemonte con cobertura de ceniza (IEE)

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	
Ausente	X

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	
Húmedo	X
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	#	Objetivo	tipo
	#		tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	
Sol y nubes	
Nublado	X
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	
Cultivo	Cacao
Erial	
Extracción o vertido	
Otro	

MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	31.9 °C	Temp T2	32.8 °C
Acimut solar	272.32°	Altura solar	14.85 °

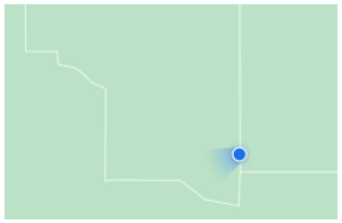
IMPACTOS CERCANOS

Poblados	
Carreteras	X
Depósitos de residuos	
Industria	
Otros	

ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	Si
Color	Verde
Vegetación circundante	Herbácea

CROQUIS



OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

Actividad petrolera

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Provincia	Sucumbios
Cantón	Shushufindi
Parroquia	Siete de Julio
Sector	Jivino Verde

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	EC - S - 024
Fecha	16/09/2022
Hora	17:23 PM
Fotografías	Ec (118 a 121)

POSICIONAMIENTO

(UTM, WGS84 Z18S

Coord. X	305832,705	m
Coord. Y	9973005,957	m
Altitud	279.193	msnm
Precisión (h;v)		m
Equipo	Mobile Mapper	
Altura antena	0	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	X
Suave (5 a 12%)	
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

Piedemonte con cobertura de ceniza (IEE)

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	
Ausente	X

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	
Húmedo	X
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	#	Objetivo	tipo
	#		tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	
Sol y nubes	
Nublado	X
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	
Cultivo	Maiz
Erial	
Extracción o vertido	
Otro	

MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	29.1 °C	Temp T2	28.9°C
Acimut solar	272.25 °	Altura solar	9.85 °

IMPACTOS CERCANOS

Poblados	X
Carreteras	X
Depósitos de residuos	
Industria	
Otros	

CROQUIS

ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	No
Color	Verde
Vegetación circundante	Herbácea

OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

Actividad petrolera

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

senescyt

INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Provincia	Sucumbios
Cantón	Shushufindi
Parroquia	Shushufindi
Sector	María Magdalena

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	EC - C - 025
Fecha	16/09/2022
Hora	17:50 PM
Fotografías	Ec (122 a 125)

POSICIONAMIENTO

(UTM, WGS84 Z18S

Coord. X	308373,222	m
Coord. Y	9971077,072	m
Altitud	280.496	msnm
Precisión (h;v)		m
Equipo	Mobile Mapper	
Altura antena	0	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	X
Suave (5 a 12%)	
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

Piedemonte con cobertura de ceniza (IEE)

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	X
NO	

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	
Ausente	X

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	
Húmedo	X
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	#	Objetivo	tipo
	#		tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	
Sol y nubes	
Nublado	X
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	
Cultivo	Cacao
Erial	
Extracción o vertido	
Otro	

MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	27.3 °C	Temp T2	26.6 °C
Acimut solar	272.18 °	Altura solar	3.11 °

IMPACTOS CERCANOS

Poblados	
Carreteras	X
Depósitos de residuos	
Industria	
Otros	

ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	Si
Color	Verde
Vegetación circundante	Herbácea

CROQUIS

OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

Actividad petrolera

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

senescyt

INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Provincia	Sucumbios
Cantón	Shushufindi
Parroquia	La Magdalena
Sector	24 de Mayo

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	EC - C - 026
Fecha	16/09/2022
Hora	18:16 PM
Fotografías	Ec (126 a 128)

POSICIONAMIENTO

(UTM, WGS84 Z18S

Coord. X	309274,387	m
Coord. Y	9967617,280	m
Altitud	264.222	msnm
Precisión (h;v)		m
Equipo	Mobile Mapper	
Altura antena		m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	
Suave (5 a 12%)	X
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

Piedemonte con cobertura de ceniza (IEE)

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	X
NO	

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	X
Ausente	

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	
Húmedo	X
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	#	Objetivo	tipo
	#		tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	
Sol y nubes	
Nublado	X
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	X
Herbácea	
Cultivo	
Erial	
Extracción o vertido	
Otro	Varios

MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	24.5 °C	Temp T2	25.6°C
Acimut solar	272.14°	Altura solar	-3.39 °

IMPACTOS CERCANOS

Poblados	
Carreteras	X
Depósitos de residuos	
Industria	
Otros	

ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	Si
Color	Verde
Vegetación circundante	

CROQUIS

OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

Actividad petrolera

POLITÉCNICA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

senescyt Secretaría Nacional de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA TOPOGRÁFICA Y CARTOGRAFÍA

INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Provincia	Sucumbíos
Cantón	Shushufindi
Parroquia	Limoncocha
Sector	Tres de Noviembre

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	EC - S - 027
Fecha	17/09/2022
Hora	7:52 AM
Fotografías	Ec (129 a 132)

POSICIONAMIENTO

(UTM, WGS84 Z18S

Coord. X	287023,717	m
Coord. Y	9979578,169	m
Altitud	296.073	msnm
Precisión (h;v)		m
Equipo	Mobile Mapper	
Altura antena	0	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	
Suave (5 a 12%)	X
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

Piedemonte con cobertura de ceniza (IEE)

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	X
Ausente	

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	
Húmedo	X
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	#	Objetivo	tipo
	#		tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	
Sol y nubes	
Nublado	X
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	
Cultivo	Cacao
Erial	
Extracción o vertido	
Otro	

MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	24.6 °C	Temp T2	24.6 °C
Acimut solar	87.68 °	Altura solar	27.41 °

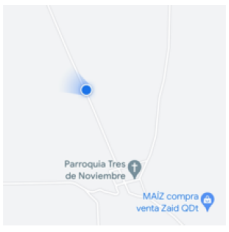
IMPACTOS CERCANOS

Poblados	X
Carreteras	X
Depósitos de residuos	
Industria	
Otros	

ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	Si
Color	Verde Rojo
Vegetación circundante	Herbáceo

CROQUIS



OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

Actividad petrolera

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

senescyt

INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Provincia	Orellana
Cantón	La Joya de los Sachas
Parroquia	Tres de Noviembre
Sector	Tres de Noviembre

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	EC - S - 028
Fecha	17/09/2022
Hora	8:15 AM
Fotografías	Ec (133 a 136)

POSICIONAMIENTO

(UTM, WGS84 Z18S

Coord. X	287103,116	m
Coord. Y	9977931,609	m
Altitud	298.154	msnm
Precisión (h;v)		m
Equipo	Mobile Mapper	
Altura antena		m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	X
Suave (5 a 12%)	
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

Piedemonte con cobertura de ceniza (IEE)

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	
Ausente	X

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	
Húmedo	X
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	#	Objetivo	tipo
	#		tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	
Sol y nubes	X
Nublado	
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	
Cultivo	?
Erial	
Extracción o vertido	
Otro	

MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	25.6 °C	Temp T2	26.5 °C
Acimut solar	87.52 °	Altura solar	33.15 °

IMPACTOS CERCANOS

Poblados	
Carreteras	X
Depósitos de residuos	
Industria	
Otros	

CROQUIS

ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	
Color	
Vegetación circundante	

OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

Vegetación –> 28 c

Actividad petrolera

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

senescyt

INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Provincia	Orellana
Cantón	La Joya de los Sachas
Parroquia	Tres de Noviembre
Sector	San Pedro

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	EC - S - 029
Fecha	17/09/2022
Hora	8:52 AM
Fotografías	Ec (137 a 140)

POSICIONAMIENTO

(UTM, WGS84 Z18S)

Coord. X	285458,481	m
Coord. Y	9972855,722	m
Altitud	308.922	msnm
Precisión (h;v)		m
Equipo	Mobile Mapper	
Altura antena	0	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	X
Suave (5 a 12%)	
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

Piedemonte con cobertura de ceniza (IEE)

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	X
Ausente	

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	
Húmedo	X
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	#	Objetivo	tipo
	#		tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	
Sol y nubes	X
Nublado	
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	X
Cultivo	
Erial	
Extracción o vertido	
Otro	

MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	25.9 °C	Temp T2	25.8 °C
Acimut solar	87.16 °	Altura solar	42.4 °

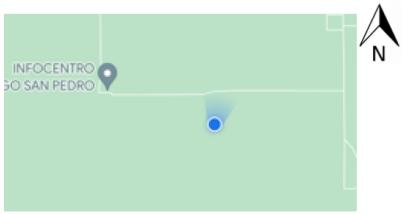
IMPACTOS CERCANOS

Poblados	
Carreteras	X
Depósitos de residuos	
Industria	
Otros	

ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	No
Color	Verde
Vegetación circundante	

CROQUIS



OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

Vegetación –> 29 c
Actividad petrolera

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Provincia	Orellana
Cantón	La Joya de los Sachas
Parroquia	Lago San Pedro
Sector	San Pedro

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	EC - S - 030
Fecha	17/09/2022
Hora	9:25 AM
Fotografías	Ec (141 a 145)

POSICIONAMIENTO

(UTM, WGS84 Z18S)

Coord. X	282163,841	m
Coord. Y	9973582,371	m
Altitud	300.354	msnm
Precisión (h;v)		m
Equipo	Mobile Mapper	
Altura antena	0	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	
Suave (5 a 12%)	X
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

Piedemonte con cobertura de ceniza (IEE)

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	
Ausente	X

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	
Húmedo	X
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	#	Objetivo	tipo
	#		tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	
Sol y nubes	X
Nublado	
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	X
Cultivo	
Erial	
Extracción o vertido	
Otro	

MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	25.8 °C	Temp T2	26.8 °C
Acimut solar	86.67 °	Altura solar	50.64 °

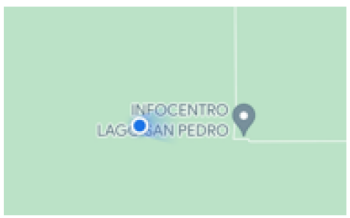
IMPACTOS CERCANOS

Poblados	
Carreteras	X
Depósitos de residuos	
Industria	
Otros	

ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	
Color	
Vegetación circundante	

CROQUIS



OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

Actividad petrolera

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

senescyt

INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Provincia	Orellana
Cantón	La Joya de los Sachas
Parroquia	Lago San Pedro
Sector	San Pedro

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	EC - C - 031
Fecha	17/09/2022
Hora	10:11 AM
Fotografías	Ec (146 a 149)

POSICIONAMIENTO

(UTM, WGS84 Z18S

Coord. X	281106,815	m
Coord. Y	9975859,424	m
Altitud	313.374	msnm
Precisión (h;v)		m
Equipo	Mobile Mapper	
Altura antena	0	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	X
Suave (5 a 12%)	
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

Piedemonte con cobertura de ceniza (IEE)

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	
Ausente	X

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	
Húmedo	X
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	#	Objetivo	tipo
	#		tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	
Sol y nubes	X
Nublado	
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	
Cultivo	Cacao
Erial	
Extracción o vertido	
Otro	

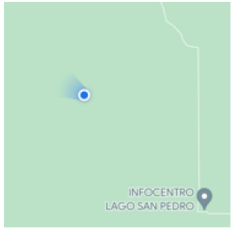
MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	27.5 °C	Temp T2	26.0 °C
Acimut solar	85.44 °	Altura solar	62.11 °

IMPACTOS CERCANOS

Poblados	
Carreteras	X
Depósitos de residuos	
Industria	
Otros	

CROQUIS



ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	No
Color	Verde
Vegetación circundante	Hojarazca

OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

Otra variedad de cacao

Actividad petrolera

POLITÉCNICA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

senescyt Secretaría Nacional de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA TOPOGRÁFICA Y CARTOGRAFÍA

INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Provincia	Orellana
Cantón	La Joya de los Sachas
Parroquia	Lago San Pedro
Sector	El Chamanal

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	EC - S - 032
Fecha	17/09/2022
Hora	10:40 AM
Fotografías	Ec (150 a 154)

POSICIONAMIENTO

(UTM, WGS84 Z18S

Coord. X	280554,499	m
Coord. Y	9979743,658	m
Altitud	318.534	msnm
Precisión (h;v)		m
Equipo	Mobile Mapper	
Altura antena	0	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	
Suave (5 a 12%)	X
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

Piedemonte con cobertura de ceniza (IEE)

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	X
Ausente	

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	
Húmedo	X
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	#	Objetivo	tipo
	#		tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	
Sol y nubes	X
Nublado	
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	X
Cultivo	
Erial	
Extracción o vertido	
Otro	

MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	26.5 °C	Temp T2	27.9°C
Acimut solar	83.94 °	Altura solar	69.34 °

IMPACTOS CERCANOS

Poblados	
Carreteras	X
Depósitos de residuos	
Industria	
Otros	Petróleo / Antenas

ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	
Color	
Vegetación circundante	

CROQUIS

OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

Actividad petrolera

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

senescyt

INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Provincia	Orellana
Cantón	La Joya de los Sachas
Parroquia	Tres de noviembre
Sector	Familiar Selva

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	EC - S - 033
Fecha	17/09/2022
Hora	10:39 AM
Fotografías	Ec (155 a 159)

POSICIONAMIENTO

(UTM, WGS84 Z18S)

Coord. X	281785,217	m
Coord. Y	9980571,849	m
Altitud	316.249	msnm
Precisión (h;v)		m
Equipo	Mobile Mapper	
Altura antena	0	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	X
Suave (5 a 12%)	
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

Piedemonte con cobertura de ceniza (IEE)

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	
Ausente	X

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	
Húmedo	X
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	#	Objetivo	tipo
	#		tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	
Sol y nubes	X
Nublado	
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	X
Cultivo	
Erial	
Extracción o vertido	
Otro	

MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	28.4 °C	Temp T2	27.7 °C
Acimut solar	83.94 °	Altura solar	69.34 °

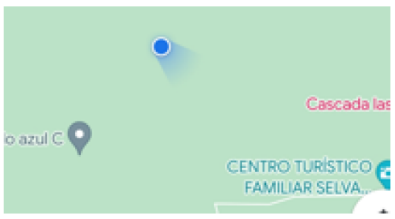
IMPACTOS CERCANOS

Poblados	
Carreteras	
Depósitos de residuos	
Industria	
Otros	Petróleo

ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	
Color	
Vegetación circundante	

CROQUIS



OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

Actividad petrolera

FICHA DE CAMPO

"INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES Y DATOS MULTIFUENTE PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN EXPLOTACIONES AGROFORESTALES"

UBICACIÓN

Provincia	Orellana
Cantón	La Joya de los Sachas
Parroquia	Tres de Noviembre
Sector	Tres de Noviembre

REGISTRO DE LA OBSERVACIÓN

Código	EC - S - 034
Fecha	17/09/2022
Hora	11:50 AM
Fotografías	Ec (160 a 164)

POSICIONAMIENTO

(UTM, WGS84 Z18S

Coord. X	283837,225	m
Coord. Y	9987216,108	m
Altitud	339.805	msnm
Precisión (h;v)		m
Equipo	Mobile Mapper	
Altura antena	0	m

PENDIENTE

Plana (0 a 5%)	
Suave (5 a 12%)	X
Media a fuerte (>12%)	

LITOLOGÍA Y/O DEPÓSITOS SUPERFICIALES

Arcillas y areniscas tobáceas (IEE)

ELEMENTOS SUPERFICIE

SI	
NO	X

PEDREGOSIDAD

Abundante	
Ocasional	X
Ausente	

HUMEDAD DEL SUELO

Seco	
Húmedo	X
Mojado	

MEDIDAS ESPECTRALES

Firma espectral	#	Objetivo	tipo
	#		tipo
	#		tipo

ESTADO DEL TIEMPO

Soleado	
Sol y nubes	X
Nublado	
Lluvioso	

USO ACTUAL

Arbórea	
Arbustiva	
Herbácea	X
Cultivo	
Erial	
Extracción o vertido	
Otro	

MEDIDAS EXPEDITAS

Temp. T1	31.4 °C	Temp T2	30.9 °C
Acimut solar	55 °	Altura solar	86.28 °

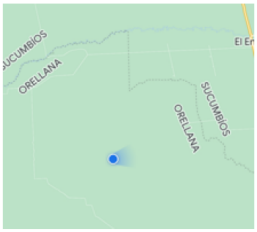
IMPACTOS CERCANOS

Poblados	
Carreteras	
Depósitos de residuos	
Industria	
Otros	

ESTADO DE LA HOJA

Daño estructural	
Color	
Vegetación circundante	

CROQUIS



OBSERVACIONES

(acceso, detección de problemas, fertirrigación, etc.)

Actividad petrolera

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

senescyt

INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR

D. Resultados edáficos y de metales pesados obtenidos por estación muestral

Num	Muestra	Coord.X	Coord.Y	Localidad	Tipo	Uso	As_mg_kg
1	mad-s-001	449996,327	4474142,482	Madrid	suelo	extraccion o vertido	5,1070
2	mad-s-002	455118,016	4476912,582	Madrid	suelo	extraccion o vertido	3,2020
3	mad-s-003	455752,352	4476972,399	Madrid	suelo	erial	4,3495
4	mad-s-005	458217,114	4472670,865	Madrid	suelo	erial	8,9172
5	mad-s-006	456698,030	4470572,970	Madrid	suelo	cultivo (cereales)	12,4398
6	mad-s-008	460148,597	4464966,900	Madrid	suelo	extraccion o vertido	2,7164
7	mad-s-009	456355,795	4462648,461	Madrid	suelo	arbustivo	10,8934
8	mad-s-010	456781,419	4461998,553	Madrid	suelo	arbustivo	9,0928
9	mad-c-012	458209,643	4461069,199	Madrid	cultivo	cultivo (olivar)	<0,01
10	mad-s-014	454076,547	4456352,285	Madrid	suelo	extraccion o vertido	5,2679
11	mad-c-016	451951,724	4452553,598	Madrid	cultivo	herbaceo	<0,01
12	mad-c-017	451930,347	4452577,021	Madrid	cultivo	cultivo (maiz)	<0,01
13	mad-s-018	449278,278	4450467,042	Madrid	suelo	erial	1,4156
14	mad-s-020	444903,569	4443064,822	Madrid	suelo	erial	5,4685
15	mad-s-021	444908,491	4442959,811	Madrid	suelo	cultivo (cereales)	8,9455
16	mad-s-021cs	442079,301	4456176,771	Madrid	cultivo	cultivo (cereales)	<0,01
17	mad-s-021cv	444908,491	4442959,811	Madrid	cultivo	cultivo (cereales)	2,2496
18	mad-c-022	444908,491	4442959,811	Madrid	cultivo	cultivo (cereales)	<0,01
19	sev-c-025	745627,244	4144954,708	Sevilla	cultivo	cultivo (tomate)	<0,01
20	sev-s-026	744202,160	4151018,497	Sevilla	suelo	suelo desnudo	17,5837
21	sev-s-027	745276,705	4155258,963	Sevilla	suelo	arbustivo	9,9495
22	sev-c-028	736492,330	4152448,827	Sevilla	cultivo	cultivo (girasol)	0,2755
23	sev-s-029	736473,913	4152369,622	Sevilla	suelo	suelo desnudo	5,1662
24	sev-c-030	736443,086	4152601,096	Sevilla	cultivo	cultivo (olivar)	<0,01
25	sev-s-031	736724,939	4141006,878	Sevilla	suelo	extraccion o vertido	5,1430
26	sev-s-032	745202,453	4139600,269	Sevilla	suelo	erial	15,7442
27	sev-s-034	744419,610	4139472,597	Sevilla	suelo	cultivo (cereales)	13,2767
28	sev-s-037	744483,088	4119950,390	Sevilla	suelo	herbaceo	5,7031
29	sev-c-038	746693,999	4120482,649	Sevilla	cultivo	cultivo (arroz)	<0,01
30	sev-s-041	745524,435	4098786,871	Sevilla	suelo	herbaceo	7,0232
31	sev-s-042	754329,316	4108035,394	Sevilla	suelo	suelo desnudo	3,7896
32	sev-s-043	752530,833	4114245,526	Sevilla	suelo	suelo desnudo	8,7245
33	sev-s-045	757709,859	4126102,803	Sevilla	suelo	suelo desnudo	9,6954
34	sev-c-046	758974,064	4127812,790	Sevilla	cultivo	cultivo (arroz)	5,6206
35	sev-c-047	757604,072	4144205,989	Sevilla	cultivo	cultivo (girasol)	<0,01
36	sev-c-048	757579,586	4144268,920	Sevilla	cultivo	cultivo (olivar)	<0,01
37	sev-s-049	756062,420	4147852,254	Sevilla	suelo	suelo desnudo	4,0810
38	sev-s-051	748501,257	4133224,128	Sevilla	suelo	suelo desnudo	2,9473
39	sev-c-052	748582,037	4133275,822	Sevilla	cultivo	cultivo (olivar)	<0,01
40	sev-s-054	752724,688	4136813,240	Sevilla	suelo	suelo desnudo	7,9384
41	sev-s-055	757169,829	4153183,602	Sevilla	suelo	herbaceo	19,3060

Num	Muestra	Coord.X	Coord.Y	Localidad	Tipo	Uso	As_mg_kg
42	sev-s-058	768633,121	4147987,236	Sevilla	suelo	herbaceo	9,5130
43	sev-s-059	768636,651	4147900,166	Sevilla	suelo	cultivo (algodon)	8,6161
44	sev-s-060	771764,791	4140002,337	Sevilla	suelo	herbaceo	2,6669
45	sev-s-062	772232,323	4100732,806	Sevilla	suelo	cultivo (almendro)	1,5578
46	sev-s-063	772223,712	4100423,307	Sevilla	suelo	suelo desnudo	2,6021
47	sev-s-065	759327,844	4119952,281	Sevilla	suelo	suelo desnudo	3,4848
48	tepro-s-001	755288,498	4113666,944	Sevilla	suelo	suelo desnudo	7,2151
49	tepro-c-004	770109,653	4101218,637	Sevilla	cultivo	cultivo (almendro)	8,9513
50	tepro-c-004s	770109,653	4101218,637	Sevilla	suelo	cultivo (almendro)	3,6673
51	ec-s-01	299264,959	9960256,277	Ecuador	suelo	cultivo (cacao)	1,5863
52	ec-c-02	299253,431	9960312,595	Ecuador	cultivo	cultivo (cacao)	0,8493
53	ec-s-03	293781,845	9965454,897	Ecuador	suelo	herbaceo	0,5705
54	ec-s-04	292406,045	9955628,408	Ecuador	suelo	cultivo (cacao)	1,6474
55	ec-s-05	291848,915	9956479,690	Ecuador	suelo	cultivo (maiz)	0,9555
56	ec-s-06	290626,097	9959214,910	Ecuador	suelo	herbaceo	<0,01
57	ec-c-07	284379,837	9960995,014	Ecuador	cultivo	cultivo (cacao)	<0,01
58	ec-c-08	289983,268	9968299,125	Ecuador	cultivo	cultivo (maiz y cacao)	<0,01
59	ec-c-09	290003,043	9968262,714	Ecuador	cultivo	cultivo (palma)	<0,01
60	ec-s-10	290922,650	9971983,577	Ecuador	suelo	cultivo (maiz y cacao)	0,5285
61	ec-c-11	293423,469	9973367,177	Ecuador	cultivo	cultivo (maiz)	1,7643
62	ec-s-12	297014,050	9976640,824	Ecuador	suelo	suelo desnudo	2,4109
63	ec-c-13	298685,756	9978854,234	Ecuador	cultivo	cultivo (palma)	<0,01
64	ec-s-14	298650,533	9978847,330	Ecuador	suelo	suelo desnudo	<0,01
65	ec-s-15	296802,962	9979373,590	Ecuador	suelo	herbaceo	<0,01
66	ec-c-16	296808,005	9979359,171	Ecuador	cultivo	cultivo (cacao)	<0,01
67	ec-s-17	295664,741	9982751,464	Ecuador	suelo	herbaceo	2,8920
68	ec-c-18	295637,190	9982708,443	Ecuador	cultivo	forestal (teca)	<0,01
69	ec-s-19	299141,950	9983765,621	Ecuador	suelo	cultivo (maiz)	<0,01
70	ec-s-20	300194,247	9984148,925	Ecuador	suelo	cultivo (palma)	0,9011
71	ec-c-21	303229,842	9983672,713	Ecuador	cultivo	cultivo (cacao)	0,3390
72	ec-s-22	305870,223	9978592,446	Ecuador	suelo	cultivo (cacao)	1,6802
73	ec-c-23	305888,492	9975631,734	Ecuador	cultivo	cultivo (cacao)	<0,01
74	ec-s-24	305832,705	9973005,957	Ecuador	suelo	cultivo (maiz)	0,2273
75	ec-c-25	308373,222	9971077,072	Ecuador	cultivo	cultivo (cacao)	<0,01
76	ec-c-26	309274,387	9967617,280	Ecuador	cultivo	arbustivo	0,2401
77	ec-s-27	287023,717	9979578,169	Ecuador	suelo	cultivo (cacao)	0,5389
78	ec-s-28	287103,115	9977931,608	Ecuador	suelo	cultivo (papa china)	0,2721
79	ec-s-28c	287103,115	9977931,608	Ecuador	cultivo	cultivo (papa china)	<0,01
80	ec-s-29	285458,481	9972855,722	Ecuador	suelo	herbaceo	<0,01
81	ec-s-29c	285458,481	9972855,722	Ecuador	cultivo	herbaceo	0,5479
82	ec-s-30	282163,841	9973582,371	Ecuador	suelo	herbaceo	1,2553
83	ec-c-31	281106,815	9975859,424	Ecuador	cultivo	cultivo (cacao)	1,2329

Num	Muestra	Coord.X	Coord.Y	Localidad	Tipo	Uso	As_mg_kg
84	ec-s-32	280554,499	9979743,657	Ecuador	suelo	herbaceo	<0,01
85	ec-s-33	281785,217	9980571,849	Ecuador	suelo	herbaceo	<0,01
86	ec-s-34	283837,225	9987216,108	Ecuador	suelo	herbaceo	3,0107

Num	Cd_mg_kg	Cr_mg_kg	Cu_mg_kg	Hg_mg_kg	Ni_mg_kg	Pb_mg_kg	Zn_mg_kg
1	0,4133	10,8390	8,1803	0,0118	3,3060	9,3769	31,0367
2	0,0957	50,0670	3,5281	0,0037	3,5361	6,8799	15,1208
3	0,4078	29,0117	15,1123	0,0766	14,3425	28,5301	58,0639
4	0,2982	21,6113	7,8437	0,0191	10,6150	19,6287	30,6653
5	0,3048	25,7939	12,2616	0,1936	11,6263	24,9967	43,6988
6	0,0476	1,9574	1,7946	0,0005	3,5686	2,4464	10,6049
7	0,2324	19,0920	10,1103	0,0856	11,9563	20,4303	38,7061
8	0,3806	25,8547	11,3345	0,0506	13,4907	30,0722	50,3016
9	0,0212	<0,01	16,4140	0,0102	0,4578	<0,01	27,6964
10	0,2703	13,3517	8,1621	0,0407	5,7457	18,5422	37,3617
11	0,0207	10,1780	10,0817	0,0085	4,1478	0,0604	16,3547
12	0,0710	2,1274	20,4462	0,0056	0,9700	0,5844	62,3755
13	0,0634	1,7168	1,8759	0,0095	1,6499	3,0405	8,8022
14	0,3091	22,3526	10,2318	0,0213	6,8469	25,3418	52,7329
15	0,5016	15,9336	7,5570	0,0218	7,4870	31,5630	30,6142
16	<0,01	2,4948	4,9507	0,0037	0,9062	<0,01	26,2868
17	0,0997	24,1507	13,4769	0,0167	7,4952	5,2980	35,6970
18	0,0128	5,3981	5,0942	0,0020	1,9314	<0,01	20,2221
19	0,1654	1,0806	22,4559	0,0086	0,9756	0,3982	110,9324
20	0,7568	51,2760	35,2540	0,0906	14,6470	62,9852	76,1168
21	0,7402	59,6907	50,4886	0,1419	22,2962	94,1616	198,8690
22	0,1044	<0,01	45,2108	0,0183	0,5524	0,3618	46,9880
23	0,5592	66,8256	15,7002	0,0177	26,6469	35,2727	56,7302
24	0,0297	<0,01	156,9527	0,0390	0,6987	0,1567	16,2304
25	0,3148	27,4002	47,2706	0,1056	8,0933	45,0260	161,6032
26	0,4421	56,0728	23,9635	0,0916	17,4155	40,1270	88,9460
27	0,4783	58,3072	15,9293	0,0208	21,8949	36,5334	47,8480
28	0,2369	33,6328	10,5095	0,0131	11,9949	19,7304	32,4184
29	<0,01	5,5056	20,3343	0,0073	1,8428	0,5434	26,9287
30	0,4855	54,1566	22,2826	0,0275	25,1397	46,5242	58,5221
31	0,3923	59,2371	24,6422	0,0405	22,2806	39,1967	61,2729
32	0,4616	56,8575	49,1752	0,0797	22,0978	42,6566	64,0354
33	0,4837	60,9854	28,0315	0,0600	24,4347	48,3571	61,9069
34	0,0507	11,1249	10,9174	0,0095	4,2734	1,9928	21,4847
35	0,0087	2,2174	77,0802	0,0214	0,9973	1,5861	15,2785
36	0,0372	0,6807	133,2189	0,0260	1,3487	0,5205	10,0446
37	0,3452	61,3439	11,5158	0,0118	16,2274	25,3785	49,2246

Num	Cd_mg_kg	Cr_mg_kg	Cu_mg_kg	Hg_mg_kg	Ni_mg_kg	Pb_mg_kg	Zn_mg_kg
38	0,1486	14,8987	4,7376	0,0080	6,4165	10,0376	12,4246
39	<0,01	<0,01	127,0938	0,0182	0,5198	<0,01	28,0948
40	0,2754	38,3715	254,1266	0,0201	12,9059	26,8096	33,3967
41	0,5362	79,5721	47,2260	0,0697	26,2179	47,5090	60,8077
42	0,5342	67,4965	29,2656	0,0535	26,1823	47,6612	77,9388
43	0,5293	41,7360	34,2757	0,2489	21,1644	66,6139	78,1191
44	0,5073	53,3479	19,2227	0,0098	19,9141	26,7979	49,2360
45	0,3736	42,0586	34,3334	0,0894	19,4667	23,6780	57,1116
46	0,2973	34,2500	18,6212	0,0338	15,2217	15,2581	41,4352
47	0,5101	70,3151	38,2374	0,0543	24,9144	45,4818	84,2547
48	0,4715	45,8560	26,8882	0,0753	21,5060	36,4595	55,5517
49	10,3317	0,4222	15,2134	0,0095	6,6314	9,0321	32,4670
50	0,3779	32,8580	10,7175	0,0093	12,2640	15,8403	29,0317
51	1,4213	50,6894	60,4260	0,1414	20,7227	53,7366	137,1370
52	2,1570	<0,01	13,3393	0,0047	0,7626	0,6448	40,7782
53	0,5119	32,8273	33,6542	0,0153	17,3674	34,7262	76,2327
54	1,0831	44,4877	61,3876	0,1063	18,8938	48,8309	129,4054
55	0,6650	26,2228	36,6447	0,0686	12,8774	26,6471	77,5189
56	0,7714	43,6595	70,3679	0,0750	22,4681	50,4758	116,0673
57	3,8511	<0,01	13,8945	0,0039	0,7355	1,0499	74,4737
58	0,1351	8,7145	12,2933	0,0039	4,3912	0,6963	18,4683
59	0,0148	32,5601	6,3231	0,0357	14,3300	1,4693	18,5597
60	0,4258	17,4260	28,5357	0,0585	10,2338	18,2901	55,0748
61	0,0902	4,6154	8,6311	0,0040	2,7113	0,8152	46,4578
62	1,0123	32,3348	40,4885	0,0762	16,5831	31,7197	87,6363
63	0,0359	14,3111	16,1860	0,0284	6,9831	0,9361	11,8610
64	0,7673	24,5044	29,9064	0,0816	11,9720	23,8962	71,6391
65	1,0573	51,2624	51,0645	0,1022	20,7518	42,4729	130,3741
66	2,0616	3,6987	14,6152	0,0117	1,5686	1,2630	145,2810
67	0,9580	58,3553	47,8099	0,1180	20,8344	45,1249	132,9391
68	0,1368	<0,01	10,7526	0,0166	0,6825	1,2806	19,5951
69	0,4950	26,4897	29,6663	0,0582	15,7635	24,6928	62,1629
70	0,6724	42,3476	33,8455	0,0816	16,8365	30,6338	90,6745
71	1,6218	0,6504	8,1138	0,0081	0,8272	0,5756	30,3175
72	0,7310	42,2195	48,3987	0,1565	17,5638	43,5854	110,2914
73	1,2451	5,3449	9,9937	0,0049	3,3292	0,5778	50,2726
74	1,0777	91,5075	54,3151	0,1189	36,1377	56,4982	164,6121
75	4,1514	0,2214	8,2037	0,0077	0,8583	0,9034	42,0573
76	0,0457	2,5215	18,2204	0,0140	2,2254	1,4380	27,4320
77	0,6698	29,0680	29,1072	0,0569	15,6541	24,3639	89,9297
78	0,4583	26,3761	23,7984	0,0444	14,7406	20,5584	69,8720
79	0,0251	1,4411	6,4624	0,0093	1,6475	0,9351	49,8984

Num	Cd_mg_kg	Cr_mg_kg	Cu_mg_kg	Hg_mg_kg	Ni_mg_kg	Pb_mg_kg	Zn_mg_kg
80	0,4707	21,5858	30,7417	0,0954	11,1202	21,4262	69,7404
81	<0,01	17,4384	4,8802	0,0024	8,0368	1,3077	21,1479
82	0,3371	13,1698	20,6422	0,0855	7,3041	13,8796	38,9472
83	0,2296	0,4151	15,5204	0,0121	1,0925	1,1052	48,4329
84	0,4100	25,8594	26,8209	0,0472	16,2719	20,1596	55,9094
85	0,5039	42,5621	37,3820	0,0193	21,6794	26,5343	69,3375
86	0,4949	49,2853	16,9237	0,2356	11,6886	52,4738	72,5882

Num	pH	%MO	CE_µs_cm	%Arena	%Limo	%Arcilla	Textura
1	7,7400	3,8970	253,0000	80	10	10	areno francoso
2	8,5600	1,2309	142,7000	85	10	5	areno francoso
3	6,7900	2,9471	77,4000	20	10	70	arcilloso
4	8,2300	4,0161	114,4000	45	5	50	arcillo arenoso
5	7,7000	4,3740	177,8000	75	20	5	areno francoso
6	9,0100	0,2646	44,9000	100	0	0	arenoso
7	7,8200	3,8076	217,0000	60	20	20	franco arenoso
8	7,7400	4,8837	187,5000	75	20	5	areno francoso
10	8,0100	2,8409	182,3000	50	30	20	franco
13	7,5900	4,5131	2120,0000	80	10	10	areno francoso
14	7,9800	4,5424	1770,0000	40	35	25	franco
15	7,1900	4,7555	200,0000	10	60	30	franco arcillo limoso
20	5,9000	2,9353	63,7000	70	25	5	franco arenoso
21	7,5700	9,9120	379,0000	60	30	10	franco arenoso
23	7,5100	4,8038	189,3000	5	40	55	arcillo limoso
25	7,4300	5,4290	1590,0000	80	15	15	areno francoso
26	7,6900	6,8036	261,0000	45	25	30	franco arcillo arenoso
27	6,3300	5,1411	131,6000	25	25	50	arcilloso
28	7,6100	3,4690	188,8000	70	20	10	franco arenoso
30	8,0000	17,6022	11790,0000	15	40	45	arcillo limoso
31	7,5700	7,1234	1781,0000	10	50	40	franco arcillo limoso
32	7,6900	10,7556	2210,0000	25	40	35	franco arcilloso
33	7,3400	10,0000	2960,0000	55	30	15	franco arenoso
37	8,1000	5,0304	195,3000	25	40	35	franco arcilloso
38	8,2700	1,6204	60,8000	80	10	10	areno francoso
40	7,9100	4,8349	172,6000	60	20	20	franco arenoso
41	7,8100	6,8197	235,0000	50	20	30	franco arcillo arenoso
42	7,6800	4,2155	285,0000	30	45	25	franco
43	7,7200	3,8974	322,0000	55	25	20	franco arenoso
44	7,8400	4,2804	237,0000	25	45	30	franco arcilloso
45	7,6700	3,7408	181,7000	30	30	40	franco arcilloso
46	7,7400	5,5292	250,0000	25	25	50	arcilloso
47	7,4000	8,4014	1510,0000	20	20	60	arcilloso

Num	pH	%MO	CE_µs_cm	%Arena	%Limo	%Arcilla	Textura
48	7,6000	8,6424	2030,0000	25	25	50	arcilloso
50	7,9800	4,1708	235,0000	10	40	50	arcillo limoso
51	5,8300	15,4683	53,4000	50	20	30	franco arcillo arenoso
53	7,6800	3,7227	17,3400	90	5	5	arenoso
54	5,7000	7,9289	29,2000	40	35	25	franco
55	7,2400	3,7904	41,8000	60	25	15	franco arenoso
56	7,9400	8,6397	24,9000	30	35	35	franco arcilloso
60	5,9700	7,4753	31,1000	80	15	5	areno francoso
62	6,1700	7,9683	77,5000	60	25	15	franco arenoso
64	5,9200	11,2786	46,5000	40	35	25	franco
65	7,3000	15,9219	42,0000	10	55	35	franco arcillo limoso
67	6,2100	13,9293	54,1000	50	20	30	franco arcillo arenoso
69	7,6100	4,2445	39,0000	80	15	5	areno francoso
70	6,1300	14,2673	18,7400	55	30	15	franco arenoso
72	5,5300	26,1561	88,2000	60	25	15	franco arenoso
74	5,7300	9,9179	138,0000	30	35	35	franco arcilloso
77	7,0500	14,4907	55,2000	75	10	15	franco arenoso
78	5,9300	4,0903	43,5000	90	5	5	arenoso
80	7,5600	12,7824	30,0000	80	10	10	areno francoso
82	6,6900	25,3031	46,8000	60	25	15	franco arenoso
84	7,7100	11,3971	19,3200	80	10	10	areno francoso
85	6,5900	0,8752	15,9900	90	5	5	arenoso
86	5,7000	22,0895	16,0800	80	10	10	areno francoso

E. Estadillos de recolección de firmas espectrales

Personal: Francisco J R	Lugar: Campus Ponferrada	Fecha y hora: 7-8-2021 - 14:30
Tipo de muestras: SUELOS Y CULTIVOS	Recipiente de las muestras: PLATOS	Observaciones: platos pequeños
Modo medición: (pistol/sonda) Dato medido:(reflectancia, radiancia)	Panel calibración: (circular, leaf-clip, cuadrado 25x25)	Luz: (1 lámpara, 2 lámparas, sonda, luz solar
Nombre carpeta/ ficheros medidas:	70210802_FranCabrera	**Mediciones con ASD-FS4**

Muestra	Nombre base	Id medidas	Observaciones	Nombre	Id	Observac.
mad-s-001	TRI	1 - 4	0 → blanco	TAN	1 - 4	0 → blanco
mad-s-002		5 - 8			5 - 8	
mad-s-003		9 - 12			9 - 12	
mad-s-005		13 - 16			13 - 16	
mad-s-006		17 - 20			17 - 20	
mad-s-008		21 - 24			21 - 24	
mad-s-009		25 - 28			25 - 28	
mad-s-010		29 - 32			29 - 32	
mad-s-014		33 - 36			33 - 36	
mad-s-018		37 - 40			37 - 40	
mad-s-020		41 - 44			41 - 44	
mad-s-021		45 - 48			45 - 48	
sev-s-026		49 - 52			49 - 52	
sev-s-027		53 - 56			53 - 56	
sev-s-029		57 - 60			57 - 60	
sev-s-031		61 - 64			61 - 64	
sev-s-032		65 - 68			65 - 68	
sev-s-034		69 - 72			69 - 72	
sev-s-037		73 - 76			73 - 76	
sev-s-041		77 - 80			77 - 80	
sev-s-042		81 - 84			81 - 84	
sev-s-043		85 - 88			85 - 88	
sev-s-045		89 - 92			89 - 92	
sev-s-049		93 - 96			93 - 96	
sev-s-051		97 - 100			97 - 100	
sev-s-054		101 - 104			101 - 104	
sev-s-055		105 - 108			105 - 108	
sev-s-058		109 - 112			109 - 112	
sev-s-059		113 - 116			113 - 116	
sev-s-060		117 - 120			117 - 120	
sev-s-062		121 - 124			121 - 124	
sev-s-063		125 - 128			125 - 128	
sev-s-065		129 - 132			129 - 132	
tepro-s-001		133 - 136			133 - 136	
tepro-s-004		137 - 140	141 → blanco		137 - 140	141 → blanco
mad-c-012	C	1 - 4	0 → blanco			
mad-c-016		5 - 8				
mad-c-017		9 - 12				
mad-c-021s		13 - 16				
mad-c-021v		17 - 20				
mad-c-022		21 - 24				
sev-c-025		25 - 28				
sev-c-028		29 - 32				
sev-c-030		33 - 36				
sev-c-038		37 - 40				
sev-c-046		41 - 44				
sev-c-047		45 - 48				
sev-c-048		49 - 52				
sev-c-052		53 - 56				
tepro-c-004		57 - 60	61 → blanco			

Mediciones con ASD-FS4

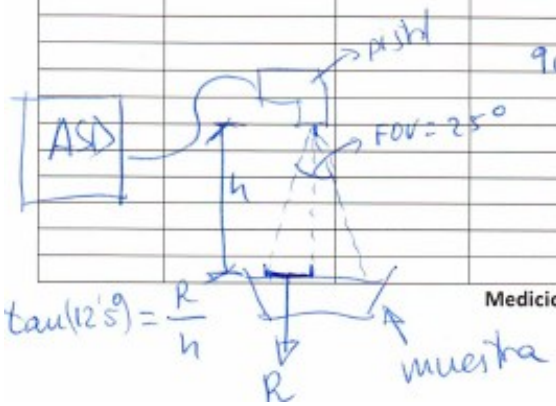
Personal: Francisco, JR, Karol	Lugar: Ronferrado (La5).	Fecha y hora: 17/10/2022 12:30pm
Tipo de muestras: Suelo, cultº	Recipiente de las muestras:	Observaciones: 9 cm. fibra.
Modo medición: (pistol/sonda) Dato medido:(reflectancia, radiancia)	Panel calibración: (circular, leaf-clip, cuadrado 25x25)	Luz: (1 lámpara, 2 lámparas, sonda, luz solar
Nombre carpeta/ ficheros medidas:	20221017_FranCabrera	**Mediciones con ASD-FS4**

Muestra	Nombre base	Id medida	Observaciones
EC-S-01	1-4	1-4	EC-S-00 Blanco. EC-S-compost-00 Blanco
EC-S-03	5-8		
EC-S-04	9-12		
EC-S-05	13-16	5-8	
EC-S-06	17-20		
EC-S-10	21-24	9-12	
EC-S-12	25-28		
EC-S-14	29-32	13-16	
EC-S-15	33-36		
EC-S-17	37-40	17-20	
EC-S-19	41-44		
EC-S-20	45-48	21-24	
EC-S-22	49-52		
EC-S-24	53-56		
EC-S-27	57-60		
EC-S-28	61-64	25-28	
EC-S-29	65-68		
EC-S-30	69-72	29-32	
EC-S-32	73-76		
EC-S-33	77-80	33-36	
EC-S-34	81-84		
EC-C-02	~~420~~	1-4	EC-C-00 Blanco.
EC-C-07		5-8	
EC-C-08		9-12	
EC-C-09	0-3	13-16	
EC-C-11		17-20	
EC-C-13	4-7	21-24	
EC-C-16	8-11	25-28	
EC-C-18		29-32	
EC-C-21		33-36	
EC-C-23	12-15	37-40	
EC-C-25		41-44	
EC-C-26		45-48	
EC-S-28c	16-19	49-52	EC-C-Compost-20 Blanco
EC-S-29c		53-56	
EC-C-31		57-60	

Distancia Pistol – Muestra.

9cm = h = 9cm → equivale a huella de R = 2cm

Diámetro de huella = 4cm



Mediciones con ASD-FS4