

Firmas espectrales de especies vegetales, suelo y agua de la cuenca del río Chira, región Piura

Spectral signatures of plant species, soil and water in the Chira river basin, Piura region

Cristhian Aldana¹, Wilmer Moncada¹, Jhony Gonzales¹, Yesenia Saavedra¹, David Gálvez¹
caldana@unf.edu.pe

RESUMEN

El monitoreo y detección remota va creciendo exponencialmente, especialmente cuando se trata de la dinámica del comportamiento espectral de diferentes objetos situados en la superficie de la tierra; por lo que, dichas observaciones permiten comprender diversos fenómenos con información actualizada, sirviendo ello, para tomar decisiones responsables en dicho contexto. Tal es así que, una firma espectral obtenida con el espectrorradiómetro FieldSpec4 permite la identificación mediante sensoramiento remoto de distintos tipos de cobertura de especies vegetales, suelo y agua de la cuenca del río Chira, región Piura. Se elaboró la ubicación geográfica satelital de dicha cuenca utilizando el shape correspondiente, un modelo de elevación digital DEM, SNAP y ENVI; para luego, en función de los patrones espectrales clasificar dichas especies a partir de la construcción de librerías espectrales que contienen longitudes de onda desde los 350 nm hasta los 2500 nm con un intervalo de 1 nm, correspondiéndole valores de reflectancia del suelo entre 0 y 1. Finalmente, el procesamiento y presentación de las firmas espectrales recogidas se procesaron en gabinete, realizando el filtro correspondiente de los datos originales y la aplicación del método de la media móvil, determinando así firmas espectrales de especies vegetales, tales como: *Muntingia calabura*, *Jatropha curcas*, *Ipomoea carnea* la popular borrachera, *Inga feuilleei*, entre otros; suelo con chamiso, suelo con overal, suelo rocoso, suelo con cadmio, entre otros; y, agua de la cuenca del río Chira, región Piura, medidos con el espectrorradiómetro FieldSpec4, sistematizando así una biblioteca de firmas espectrales, que en futuros trabajos servirían para la obtención o clasificación de mapas de cobertura, uso de suelo entre otros, de diferentes elementos sobre la superficie de la tierra en cualquier zona geográfica de interés.

Palabras clave: Firma espectral, espectrorradiómetro, imagen satelital, cuenca del río Chira, FieldSpec4

ABSTRACT

Monitoring and remote sensing are growing exponentially, especially regarding the dynamics of the spectral behavior of different objects on the earth's surface; therefore, such observations allow understanding of various phenomena with updated information, serving to make responsible decisions in this context. Thus, a spectral signature obtained with the FieldSpec4 spectroradiometer allows the identification by remote sensing of different types of plant species covered, soil, and water in the Chira river basin, Piura region. The geographic satellite location of the watershed was elaborated using the corresponding shape, a DEM digital elevation model, SNAP, and ENVI; then, based on spectral patterns, these species were classified from the construction of spectral libraries containing wavelengths from 350 nm to 2500 nm with an interval of 1 nm, corresponding to ground reflectance values between 0 and 1. Finally, the processing and presentation of the collected spectral signatures were processed in the office, performing the corresponding filtering of the original data and the application of the moving average method, thus determining spectral signatures of plant species, such as: *Muntingia calabura*, *Jatropha curcas*, *Ipomoea carnea* la popular borrachera, *Inga feuilleei*, among others; soil with chamiso, soil with overal, rocky soil, soil with cadmium, among others; and, the water of the Chira river basin, Piura region, measured with the spectroradiometer FieldSpec4, thus systematizing a library of spectral signatures, which in future works would

¹Instituto de Investigación en Desarrollo Sostenible y Cambio Climático – INDESC,
Universidad Nacional de Frontera, Sullana, Piura, Perú

serve to obtain or classify maps of land cover, land use among others, of different elements on the surface of the earth in any geographic area of interest.

Keywords: Spectral signature, spectroradiometer, satellite image, Chira river basin, FieldSpec4

1. INTRODUCCIÓN

Adami et al. (2018) afirma que, existen diferentes enfoques para monitorear la dinámica de la vegetación, entre ellos, el de uso de series de tiempo de alta calidad de reflectancia superficial MODIS, la cual permite hacer un estudio exhaustivo relacionando la disponibilidad de agua, masa foliar y contenido de clorofila para varios tipos de vegetación, como también, es posible desarrollar sistemas de monitoreo del crecimiento del arroz con cáscara utilizando un espectrorradiómetro de detección remota a baja altitud y a partir de la banda de longitud de onda de un rango ultravioleta o una región infrarroja de onda corta (Han-Ya, Ishii y Noguchi, 2010).

Asimismo, los patrones espectrales, tales como datos relacionados a la reflectancia espectral son un método alternativo actual que permite determinar propiedades específicas de la superficie de la tierra a partir de una sistematización de datos medidos con el espectrorradiómetro FieldSpec4 (Borole et al., 2019). Adicionalmente a ello, Vasava y Das (2022), sistematizaron una biblioteca espectral utilizando firmas espectrales de suelo a granel y sus fracciones de tamaño agregado con la finalidad de evaluar las diferentes propiedades de dichos elementos del suelo, demostrando que los patrones de reflectancia espectral de diferentes fracciones de tamaño de agregado y su suelo a granel mejoran la precisión de la estimación de las fracciones de textura del suelo en el enfoque de la Espectroscopía de Reflectancia Difusa (DRS, por sus siglas en inglés).

Similar a lo anteriormente descrito, Van Dijk et al. (2021) investigaron el mapeo de áreas geográficas quemadas utilizando el comportamiento espectral a partir del análisis de la diferencia en la firma espectral entre el área geográfica quemada y los falsos positivos de las cosechas agrícolas mediante datos de imágenes de satélite Sentinel 2. Para ello utilizaron una significativa gama de índices espectrales de uso común, tales como un índice de separabilidad espectral, evaluando la discriminación entre dichas clases involucradas, concluyendo que, los índices espectrales que contiene la banda roja muestran una fuerte separabilidad similar de los falsos positivos agrícolas.

Cabe indicar que, las firmas espectrales medidas con el FieldSpec4 se relacionan en cierta medida con imágenes de satélite en sus patrones de reflectancia (Aldana et al., 2020), permitiendo reconocer, clasificar el uso de suelo, agua o especies vegetales mediante diferentes técnicas de teledetección. Al respecto, teniendo en cuenta que la reflectancia espectral es la relación entre el flujo radiante incidente y el reflejado medido desde un objeto o área en longitudes de onda específicas, a diferencia de los valores de radiancia e irradiancia; se puede afirmar que, la reflectancia es una propiedad inherente de un objeto. En consecuencia, la conversión de mediciones de campo y laboratorio de radiación espectral en valores de reflectancia es un requisito frecuente con datos terrestres en apoyo de aplicaciones de teledetección aérea y satelital en las ciencias ambientales y terrestres (Peddle et al., 2001).

Zhao et al. (2019), utilizando un espectrorradiómetro portátil en condiciones estandarizadas, desarrollaron un método no invasivo de materiales textiles para medir reflectancia tanto de muestras modernas como en materiales arqueológicos, comparando así diversas características espectrales de cuatro (4) tipos de fibras naturales. Para ello, en el rango espectral que cubre el infrarrojo visible y cercano (VNIR) (350–1000 nm), el infrarrojo de onda corta 1 (SWIR1) (1000–1850 nm) y SWIR2 (1850–2500 nm), midieron los espectros de reflexión de cuatro tipos de fibras naturales comúnmente utilizadas en textiles arqueológicos, donde el SWIR2 fue más significativo que VNIR y SWIR1, aplicando el método de discriminación denominado análisis de componentes principales.

De acuerdo a lo que afirma Aldana et al. (2021), la firma espectral del objeto identifica un conjunto de valores de reflectancia que poseen una determinada longitud de onda medida con el espectrorradiómetro, que se introduce en

el mosaico de imágenes de satélite determinado utilizando SNAP y ENVI para referenciar una determinada clase, basada en los píxeles con los mismos valores que conforman la imagen de satélite, para luego mapear la zona en estudio con los mismos parámetros que componen las clases buscadas.

En tal sentido, la metodología propuesta contribuye en la rapidez, repetibilidad, eficiencia, optimización de actividades y tareas entre otras ventajas al momento de realizar el monitoreo de la dinámica de los diferentes elementos y sus patrones de comportamiento sobre la superficie de la tierra a lo largo del tiempo (Borrás et al., 2017), generando información relacionada con la descripción del uso, cobertura y tipo de vegetación que componen las áreas geográficas de análisis en la presente investigación, entre otros (Zeferino et al., 2020).

Los resultados compartidos en los párrafos anteriores evidencian que la investigación del comportamiento espectral de objetos utilizando en esta oportunidad un espectrorradiómetro, proporcionan una herramienta poderosa para estudiar en diferentes objetos o elementos una importante cantidad de espectros en un periodo corto de tiempo en forma no destructiva, ni invasiva y rápida; por lo que, basado en dichas prácticas investigativas, la presente investigación analizó las firmas espectrales de las especies vegetales, suelo y agua en la zona muestral de la cuenca baja del río Chira, ubicada en la provincia de Sullana, Región Piura. Las mediciones se realizaron con el espectrorradiómetro “FIELDSPEC4” que tiene un rango de longitud de onda de 350 nm a 2500 nm medidos en anchos de banda de 1 nm. Las firmas espectrales correspondientes a dichos elementos en la superficie de la tierra en la cuenca baja del río Chira en la provincia de Sullana en trabajos futuros se pueden introducir en las imágenes de satélite Sentinel 2, cuya corrección radiométrica y atmosférica se realiza con el uso del paquete Sen2Cor trabajado con el software SNAP y el procesamiento para la obtención de la cobertura de vegetación es posible realizarla mediante el software ENVI.

Tal es así que, el reconocimiento de distintos tipos de coberturas vegetales se logra analizando las firmas espectrales por clasificación, diferenciación numérica y correlación estadística, encontrando patrones espectrales propios de los tipos de vegetación que conforman el píxel de la imagen de satélite en análisis. Además, la complejidad de los problemas ambientales en las cuencas, demanda de conocimientos científicos y tecnológicos que permitan establecer las vulnerabilidades y oportunidades de cada zona, reducir las incertidumbres asociadas al clima y condiciones de resiliencia de dichos ecosistemas y, en base a ello, desarrollar metodologías de seguimiento, análisis y evaluación de los elementos biofísicos y biológicos, factores, descriptores e indicadores para la caracterización de la dinámica espacial de dichos ecosistemas en la adaptación vegetal por ejemplo a la disponibilidad hídrica (Palamuleni et al., 2007).

Cabe indicar que, la información satelital también responde a parámetros atmosféricos (tales como, precipitación, cobertura de nubes, vapor de agua precipitable y otros) (Jianxi et al., 2017), cobertura de suelos (albedo superficial, índices de vegetación y agua), humedad de suelos y aguas superficiales-subterráneas, donde la información espectral de las imágenes Sentinel 2, también han demostrado su utilidad mediante la aplicación de índices biofísicos como el NDVI (en español, Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada).

Finalmente, las firmas espectrales de especies vegetales, suelo y agua medidos con el espectrorradiómetro “FieldSpec4” en la cuenca baja del río Chira, Sullana-Piura-Perú, permiten su clasificación de manera precisa y significativa en las imágenes de satélite, especialmente en las Sentinel 2, lo cual contribuiría a sistematizar la información y tomar medidas de gestión efectivas, monitoreando por ejemplo, las condiciones de crecimiento de los cultivos; así como, la formulación de políticas adecuadas, toma de decisiones y procesos de soporte de decisiones participativas en la gestión de manera eficiente e integrada de los diferentes recursos existentes, especialmente las especies vegetales, suelo y recurso hídrico de la cuenca del río Chira, articuladas al cambio climático en la Región Piura.

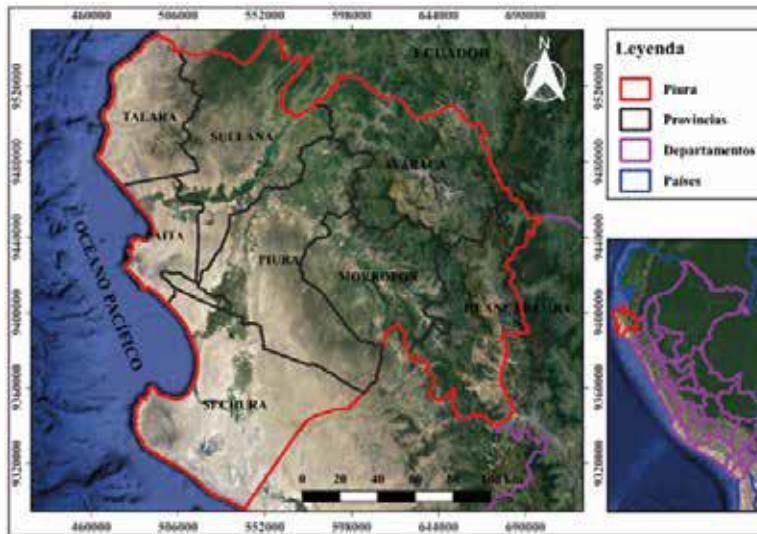
2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Área de estudio

El presente trabajo de investigación, se enmarca poblacionalmente en la región Piura, ubicada en la zona norte del Perú con coordenadas geográficas UTM Latitud Sur: 463903,64 a 698897,92 y Longitud Oeste: 9295883,14 a 9548747,01, tal como, se puede observar en la figura 1.

Figura 1

Mapa de la ubicación geográfica de la región Piura



Posee un área de superficie de 35 892,49 km² y un área de superficie insular de 1,32 km², representa el 2,8% del territorio nacional, además de una línea de costa de 392,43 km de largo. Por el norte, limita con Tumbes y la República del Ecuador; por el este, con Cajamarca y Ecuador; por el sur, con Lambayeque; por el oeste, con el Océano Pacífico. Debido a su proximidad con la línea ecuatorial, la temperatura promedio es 26 °C, presenta características de clima tropical en zona yunga y de sabana tropical a nivel del mar, o seco tropical o bosque seco ecuatorial. Puede llegar a alcanzar una temperatura máxima de 40 °C y mínima de 15 °C.

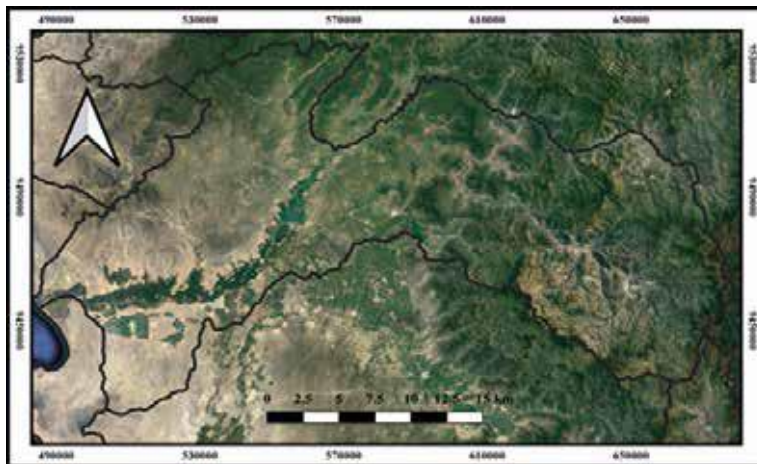
En la zona costera sur que colinda con Lambayeque, su clima suele ser semi desértico. Por otro lado, la sierra piurana tiene un clima húmedo subtropical y templado con un promedio anual de 15 °C.

Políticamente, la región Piura está dividida en 8 provincias y 64 distritos, siendo su capital la ciudad de Piura, se encuentran a diferentes altitudes siendo Ayabaca la de mayor altitud y Paita la de menor, asimismo, Sechura posee una mayor superficie y Paita la menor. Gran parte del territorio de la Región Piura se encuentra localizado en la llanura costera (60 %) y otra dentro de la cadena andina (40 %), lo cual le confiere una fisiografía muy heterogénea con paisajes y ecosistemas diversos.

Asimismo, en la provincia de Sullana en la región Piura, la zona muestral de estudio fue la Cuenca del río Chira, cuya ubicación geográfica corresponde entre los paralelos 03°40'28" y 05°07'06" de la latitud sur, y los meridianos 80°46'11" y 79°07'52" de longitud oeste. Limita por el Norte con la cuenca del río Puyango, por el Sur con las cuencas de los ríos Piura y Huancabamba, por el Este con las cuencas de Zamora y Chinchipe (Ecuador) y por el Oeste con el Océano Pacífico, tal como se muestra en la figura 2.

Figura 2

Ubicación geográfica de la Cuenca Chira, región Piura

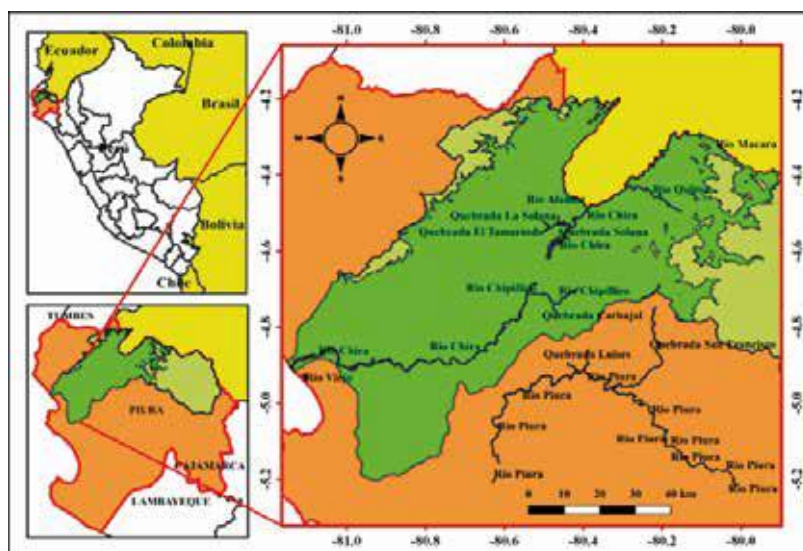


El Chira es un río internacional, y su cuenca tiene un área de drenaje superficial de 19 095 km² hasta su desembocadura en el mar; de los cuales 7 162 km² están dentro de territorio ecuatoriano y 11 933 km² dentro del territorio peruano. Su cuenca húmeda es de aproximadamente 9500 km².

El río nace en la Cordillera Occidental de los Andes a más de 3000 ms.n.m. con el nombre de Catamayo, y después de recorrer 150 km se une con el río Macará donde toma el nombre de río Chira, recorre 50 km. sirviendo de límite entre Perú y Ecuador hasta encontrarse con el río Alamor continuando en la dirección Suroeste en territorio peruano hasta su desembocadura en el mar después de haber recorrido 300 km. aproximadamente, tal como se muestra en la figura 3.

Figura 3

Ubicación geográfica de principales ríos y quebradas en la Cuenca Chira, región Piura



Sus principales afluentes son: por la margen izquierda los ríos Macará, Quiroz y Chipillico y por la margen derecha el río Alamor y varias quebradas como Hawai, Venados y Samán.

En la Región Piura, se pueden identificar diferentes áreas geográficas, donde se encuentran especies forestales tales como el sapote, el algarrobo, el hualtaco, el palo santo, entre otros. Las especies de flora

y fauna silvestre por ejemplo del bosque seco se adaptan a condiciones adversas, que por un lado los hace resistentes a las épocas de sequía y por el otro aprovechan la abundancia de la humedad para crecer y desarrollarse.

2.2. Datos espectrales de alta resolución: espectrorradiómetro FieldSpec4 Hi-Res

El FieldSpec4 Hi-Res es un espectrorradiómetro de alta resolución diseñado para mediciones de datos espectrales más rápidas y precisas para una amplia gama de aplicaciones de teledetección.

La resolución espectral SWIR VNIR de 8 nm del espectrorradiómetro FieldSpec4 Hi-Res proporciona un rendimiento espectral superior en todo el espectro de irradiancia solar (350-2500 nm). La resolución espectral mejorada en el rango SWIR (1000-2500 nm) es particularmente útil para detectar e identificar compuestos con características espectrales estrechas en las longitudes de onda más largas, como la mineralogía de alteración y los gases para el análisis atmosférico.

Además, la resolución de 8 nm cumple o supera la resolución espectral de la mayoría de los sensores hiperspectrales, lo que hace que el espectrorradiómetro FieldSpec4 Hi-Res sea una elección excelente para la validación y calibración de sensores, así como para la verificación en tierra y la construcción de bibliotecas espectrales. Al igual que todos los espectrorradiómetros ASD FieldSpec, el FieldSpec4Hi-Res se puede utilizar como un espectrómetro de alta resolución para mediciones de reflectancia de contacto muy precisas (ASD Inc., 2017), ver figura 4.

Figura 4

Espectrorradiómetro FieldSpec4 – ASD Inc



Los sistemas ASD se utilizan para determinar el estado fisiológico de la planta, incluido el estado de la enfermedad, el estado nutricional relacionado con la absorción de nitrógeno y el equilibrio de humedad. Las mediciones del dosel de la planta o las mediciones individuales de la hoja se pueden hacer utilizando espectrómetros ASD.

Se han utilizado una variedad de enfoques de análisis para determinar los indicadores de salud vegetal relevantes. Los índices vegetativos, los modelos predictivos multivariantes y los modelos de clasificación multivariante se han utilizado con éxito. Los datos espectrales se pueden obtener ya sea bajo iluminación solar o con fuentes de luz artificial. La flexibilidad de los accesorios de muestra proporcionados por los sistemas ASD permite a los investigadores recopilar datos relevantes para sus proyectos.

La figura 5 muestra las especificaciones técnicas del espectrorradiómetro FieldSpec4 Standard-Res, donde se resalta que el rango espectral es desde 350 nm hasta 2500 nm con un ancho de banda de 1 nm, además es posible medir valores de reflectancia, radiancia, transmitancia y absorbancia.

Figura 5

Especificaciones técnicas del espectrorradiómetro FieldSpec4 – ASD Inc.

Referencia	Especificaciones
Resolución Espectral	3 nm en VINR 10 nm en SWIR
Rango Espectral	350 nm - 25000 nm VINR: 350 nm - 1000 nm SWIR 1: 1001 - 1800 nm SWIR 2: 1801 - 2500 nm
Muestra Espectral (Ancho de Banda)	1 nm desde 350 a 2500 nm
Temperatura de operación	0 a 40°C
Fores Optics (lentes)	1° grado 5° grado 10° grado
Formato de exportación	ASCII
Datos que puede medir	ND (Número digital) Reflectancia Transmitancia Radiancia Absorción
Dimensiones	Altura: 12.7 cm Ancho: 36.8 cm Largo: 29.2 cm
Peso	5.44 kg

La figura 6 muestra una ilustración esquemática del uso técnico del espectrorradiómetro FieldSpec 4, donde una de las recomendaciones para una buena medición es que la posición de la pistola debe apuntar de manera vertical hacia abajo y a una altura determinada según el área a medir la misma que depende del ángulo de la lente utilizada.

Figura 6

Ilustración esquemática de una medición con el espectrorradiómetro FieldSpec4 y el uso del fore optics o FOV (Field of View)



La siguiente fórmula permite medir un área determinada, dependiendo del ángulo en grados de la lente y de la altura desde la cual se sujeta la pistola:

$$A = \pi \left(\tan \frac{\alpha}{2} d \right)^2$$

2.3 Firmas Espectrales

El reconocimiento y caracterización de tipos de coberturas se puede lograr analizando las firmas espectrales por clasificación, diferenciación numérica y correlación estadística, encontrando patrones espectrales propios de los tipos de vegetación que conforman el píxel de la imagen de satélite en análisis; lo cual permite la rapidez, repetibilidad, eficiencia, optimización de recursos económicos entre otras ventajas al momento de realizar el monitoreo del cambio a lo largo del tiempo de la descripción del uso, cobertura y tipo de vegetación que componen las áreas geográficas en evaluación.

Actualmente, a nivel nacional, regional y local se viene generando información relacionada con la gestión de recursos hídricos y cobertura vegetal, dado que no se cuenta con librerías espectrales históricas y de imágenes satelitales que puedan ser utilizadas por diversos usuarios potenciales relacionadas con el comportamiento espectral de la vegetación. Tal es así que la dinámica actual de la cobertura de la tierra, uso de la tierra, detección de cambios, mapeo de variables geofísicas para índice de área foliar, contenido de clorofila foliar, contenido de agua en hojas entre otras tiene un estudio limitado en esta zona geográfica, por lo que, se hace necesario ampliar dichos estudios a parámetros específicos que permitan posteriormente formulación de políticas, la toma de decisiones y los procesos de soporte a las decisiones participativas, en la gestión de manera eficiente e integrada de los recursos hídricos en las cuencas hidrográficas articuladas al cambio climático en la región Piura, especialmente en humedales y bosques secos de la cuenca baja del río Chira, Sullana-Piura-Perú.

Poder contar con patrones de reflectancia espectral de referencia es fundamental para lograr resultados confiables cuando se trabaja con imágenes multiespectrales o hiperespectrales, provenientes de sensores remotos. Tradicionalmente, se usa el término “verdad de terreno” para referirse a datos colectados en terreno que son usados como referencia para identificar patrones similares en la imagen. En general, estos datos de referencia se pueden usar para:

- Asistir las labores de interpretación y análisis de los datos de sensores remotos.
- Calibrar instrumentos de teledetección.
- Verificar información extraída de datos tele detectados.

Una de las formas más usadas para obtener datos de patrones espectrales referenciales es efectuar mediciones de especies vegetales, suelo y agua en superficies de interés. En la práctica, este trabajo puede efectuarse en condiciones controladas de laboratorio o directamente en el campo usando instrumentos capaces de obtener estos datos en forma instantánea, denominado espectrorradiómetro, o sencillamente radiómetros.

2.4 Librerías Espectrales

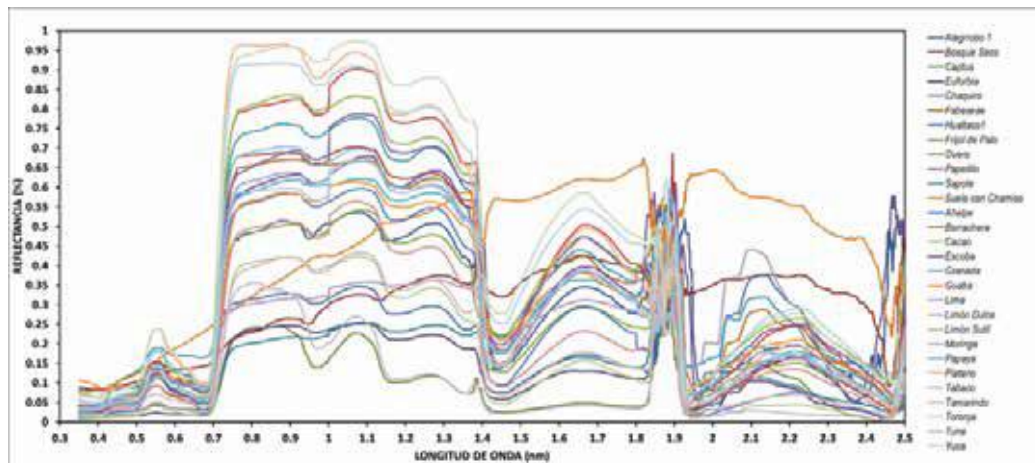
Una vez obtenidos los datos de respuesta espectrales es necesario disponerlos ordenadamente en formatos utilizables por otros potenciales usuarios. Esta labor conlleva la creación de librerías espectrales que contienen los datos de firmas espectrales de una gran variedad de materiales y cubiertas terrestres.

Por ejemplo, la librería espectral de ASTER contiene una compilación de cerca de 2000 firmas espectrales de materiales naturales y hechos por el hombre. Además, incluye datos de otras tres librerías espectrales públicas tales como: Universidad John Hopkins (JHU), Laboratorio de propulsión a reacción de la NASA (Jet Propulsion Laboratory - JPL), y el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS).

Por otro lado, si se analiza el comportamiento espectral del dosel vegetal, los factores que afectan su reflectividad son la proporción hojas, lignina y el efecto del suelo, la geometría de las hojas y los ángulos de observación de éstas. Como se puede observar, la figura 7 muestra las firmas espectrales para diferentes tipos de especies contenidas en una zona muestral de bosque seco en la cuenca del río Chira.

Figura 7

Firmas espectrales de diferentes tipos de especies vegetales, suelo y agua, contenidas en la cuenca Chira, Región Piura



En la vegetación el nivel de reflectancia se ve modificado principalmente por factores como: los tipos de pigmentos, estructura de las hojas y el contenido de humedad. El primero afecta a las longitudes de ondas del espectro visible (0,4-0,7 μ m) donde el 65% es absorbido por la Clorofila, el 29% por la Xantófila y el 6% por Carotenos. La estructura de las hojas (capa esponjosa del mesofilo) a su vez aumenta la reflectividad en la zona del infrarrojo cercano (0,8-1,1 μ m).

Finalmente, entre los rangos 1,4-1,8 μ m (infrarrojo medio) la reflectividad depende del contenido de agua entre y dentro de las células, en condiciones de hidratación normales ambos valles son profundos y marcados, en condiciones de estrés hídrico estos son menos marcados aumentando su reflectividad (Alonso & Moreno, 1996).

2.5 Descripción de las actividades realizadas

Con el fin de cumplir con los resultados planteados dentro de los límites de tiempo y recursos impuestos, la investigación se enfocó dentro de la zona de influencia en la cuenca baja del río Chira – Piura. La zona escogida es representativa; dado que, contiene amplias áreas andinas con humedales y zonas con similares especies vegetales, suelo y agua, lo que facilita la réplica de los resultados en otras zonas de similares ecosistemas y morfometría. Asimismo, se justificó el establecimiento de dicha área de estudio por sus potenciales sinergias que se pueden establecer con otros proyectos que actualmente se encuentran en desarrollo.

La metodología propuso un proceso de aprendizaje iterativo que involucra el recojo de firmas espectrales de diferentes especies vegetales, suelo y agua, datos de clima medidos en los trabajos de campo programados, así como validación, exploración y análisis de patrones espectrales. Se emplearon técnicas geoestadísticas para el tratamiento de datos obtenidos tanto del espectrorradiómetro FieldSpec 4; así como, de las imágenes de satélite Sentinel 2 que son necesarias para un análisis espectral de las especies vegetales, suelo y agua necesarios orientada a una propuesta de estrategias de monitoreo de cobertura

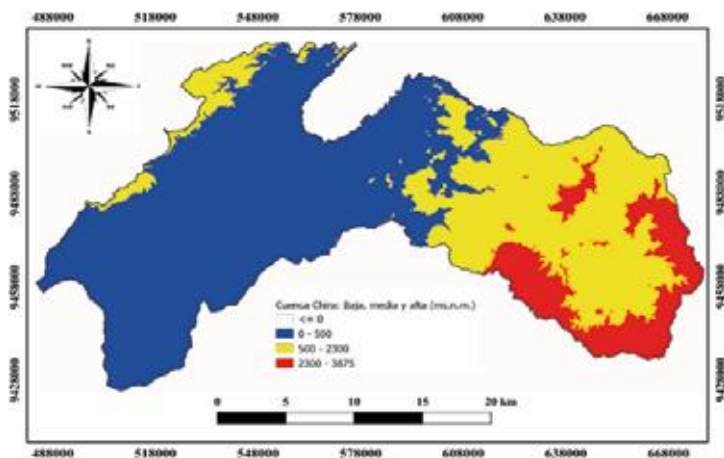
de vegetación bosques secos y humedales en la región.

Entre las técnicas que se utilizaron, tenemos: decodificación de la información de las variables de estudio, mediante las firmas espectrales medidas con el espectroradiómetro “Fieldspec4”, decodificación de la información de las variables de estudio, a partir del uso de las imágenes de satélite Sentinel 2, con el software SNAP y ENVI, análisis documental y de observación en trabajos de campo, análisis de datos con el uso del software, SNAP, ENVI+IDL, Rstudio, QGIS y el respectivo trabajo de gabinete.

Con un Modelo de Elevación Digital DEM, se clasificó la zona baja, media y alta de la cuenca del río Chira, siendo en la figura 8, la zona de color azul la cuenca baja del río Chira.

Figura 8

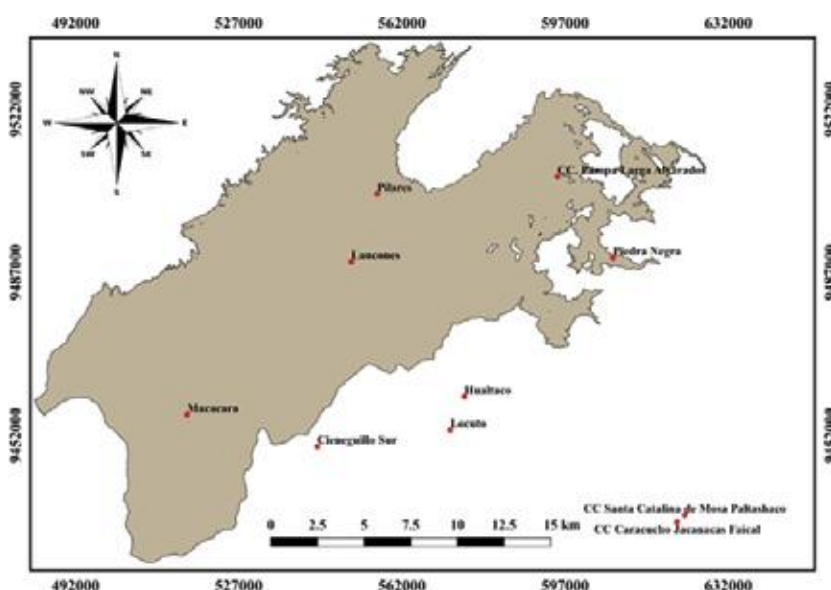
Clasificación de cuenca baja, media y alta del río Chira, región Piura.



Cabe indicar que, tal como se muestra en la figura 9, se seleccionó la cuenca baja del río Chira teniendo en cuenta las alturas correspondientes a las 8 regiones naturales del Perú, de acuerdo con la altura de la región costa o chala desde 0 a 500 ms.n.m. el siguiente mapa muestra las zonas de muestreo que han sido visitada para el recojo de las firmas espectrales.

Figura 9

Zona muestral cuenca baja del río Chira, región Piura



3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El recojo de las firmas espectrales correspondió a la diversidad de especies vegetales, suelo y agua distribuida de manera espacial en zonas de la cuenca baja del río Chira y en algunas otras zonas de la región Piura. Los archivos de datos de las firmas espectrales son valores numéricos que contiene su longitud de onda desde los 350 nm hasta los 2500 nm con un intervalo de 1 nm, para lo cual le corresponde valores de reflectancia del suelo entre 0 y 1. En tal sentido, los trabajos de campo programados en las distintas zonas de la cuenca Chira y algunas otras zonas pertenecientes a la región Piura, permitió la recolección de firmas espectrales de especies vegetales, suelo y agua, medidas con el espectrorradiómetro “FieldSpec4”, a partir de la participación de especialistas pertenecientes al equipo de investigación y miembros del Instituto de Investigación para el Desarrollo sostenible y Cambio Climático de la UNF (INDESC-UNF).

En tal sentido, se presenta el conjunto de especies vegetales, suelo y agua identificada con su firma espectral en la zona muestral, considerando su nombre de identificación común en la zona, posición geográfica, (latitud, longitud, en coordenadas UTM), altitud, temperatura ambiente, humedad relativa y temperatura de suelo, tal y como se evidencia en la tabla 1.

Tabla 1

Especies vegetales, suelo y agua, identificadas para recogida de firma espectral en la zona muestral cuenca baja del río Chira, región Piura.

N° Gráfico	Zona muestral	Nombre	Latitud (UTM)	Longitud (UTM)	Altitud (ms.n.m)	Temperatura ambiente (°C)	Humedad relativa (%)	Temperatura de suelo (°C)
a1		Bosque Seco	583708	9483993	222	35	35	42.4
a2		Cactus	594675	9507583	316	40	32	38.5
a3		Euphorbia	595348	9507565	304	41	27	30.2
a4		Chaquiuro	594728	9507575	309	34	31	43.7
a5		Fabaceae	594722	9507582	310	39	27	39.5
a6		Hualtaco	594670	9507592	316	41	29	30.6
a7		Frijol de Palo	595339	9507547	304	43	26	31.1
a8		Overo	594732	9507563	307	40	21	30.2
a9		Papelillo	594728	9507575	309	34	31	43.7
a10		Zapote	594688	9507593	315	40	28	33.1
b1		Suelo con Chamiso	594674	9507599	316	35	35	42.4
a11	Comunidad campesina	Añalque	595321	9507561	304	40	43	30
a12		Borrachera	595334	9507547	303	43	26	31.1
a13	Pampa Larga,	Cacao	595321	9507561	304	40	31	28.2
a14	Alvarados,	Escoba	595339	9507547	304	43	26	31.1
a15	distrito de Suyo,	Granada	595348	9507565	304	41	27	30.2
a16	provincia	Guaba	595340	9507557	304	42	29	26.9
a17	de Ayabaca	Lima	595326	9507574	304	45	25	31.6
a18		Limón Dulce	595326	9507574	304	45	25	31.6
a19		Limón Sutil	595326	9507574	304	45	25	31.6
a20		Moringa	595347	9507574	304	40	28	31.5
a21		Papaya	595321	9507561	303	41	31	33
a22		Plátano	595324	9507544	303	45	26	35.9
a23		Tabaco	595347	9507574	304	40	28	31.5
a24		Tamarindo	595329	9507567	304	42	28	27.8
a25		Toronja	595326	9507574	304	45	25	31.6
a26		Tuna	595347	9507574	304	40	28	31.5
q27		Yuca	595321	9507561	303	41	31	33
b2		Suelo	551142	9489281	139	32	42	40.7
b3	Distrito de Lancones, provincia de	Suelo con overal seco	551206	9489270	138	34	40	42
b4	Sullana	Suelo Rocosó	551270	9489202	141	35	42	39.7
c1		Agua del Río Chira	516133	9456738	33	34	44	36.6

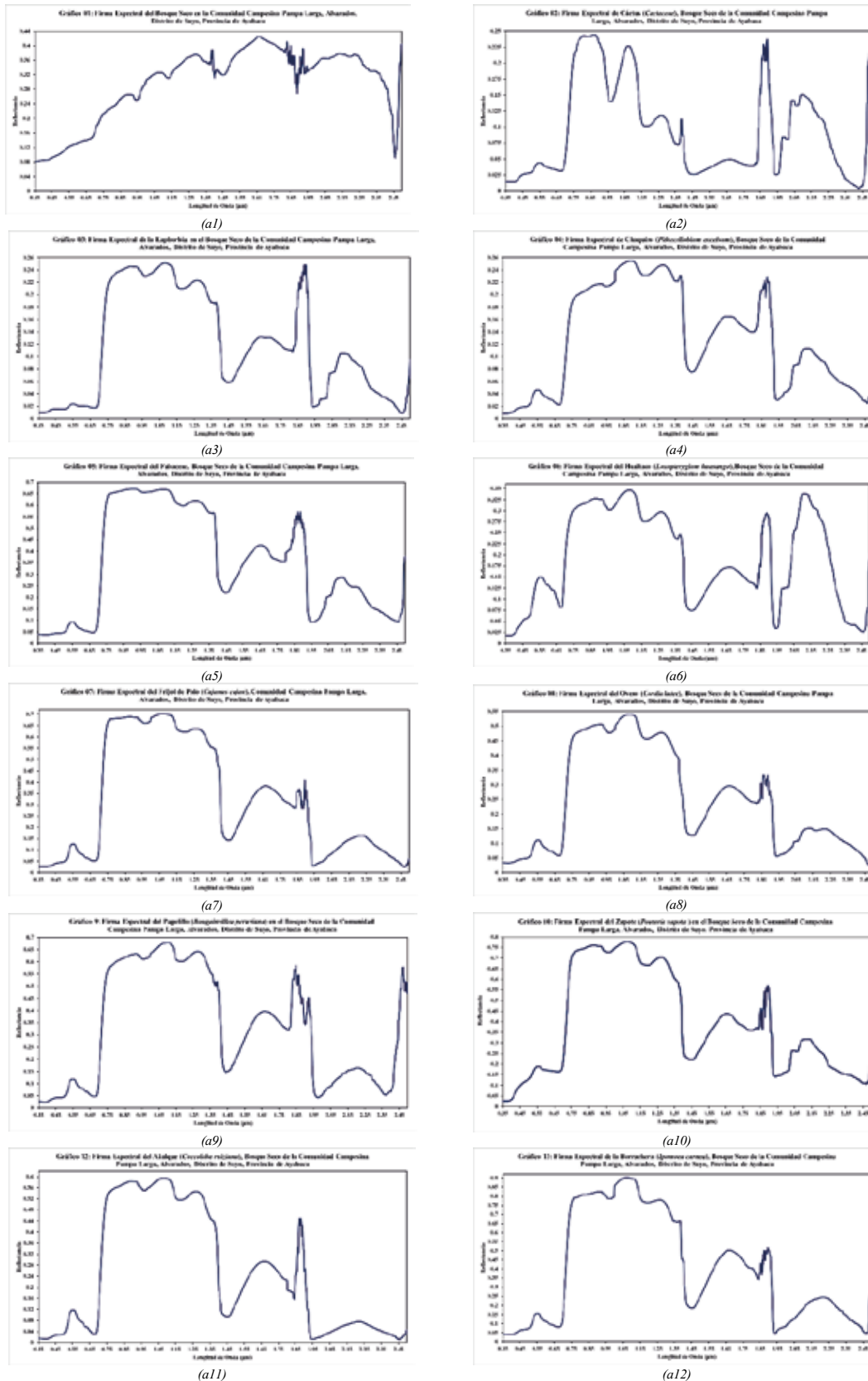
N° Gráfico	Zona muestral	Nombre	Latitud (UTM)	Longitud (UTM)	Altitud (ms.n.m)	Temperatura ambiente (°C)	Humedad relativa (%)	Temperatura de suelo (°C)
b5	Caserío Macacará del distrito la Huaca, provincia de Paíta	Suelo con Arena	515958	9456561	45	31.6	30	50
		Suelo con Arena y vegetación seca	515958	9456561	45	31.6	30	50
b7	Caserío Pilares del distrito Lancones, provincia de Sullana	Suelo con Borrachera	556735	9503837	252	30	46	38.6
b8	Caserío Olivares San Fernando, distrito de Sullana, Provincia de Sullana	Suelo salino	543846	9449594	44	30	54	32.7
b9	Caserío de Piedra Negra del distrito de Paimas, Provincia de Ayabaca	Suelo con Cadmio 1	607418	9489031	427	33	38	27.1
b10	de Paimas, Provincia de Ayabaca	Suelo con Cadmio 2	607424	9489057	423	32	43	29
b11		Suelo con Cadmio 3	607413	9489153	418	32	48	29.3
b12	Centro poblado de Locuto, distrito de Tambogrande, Provincia de Piura	Suelo con arena	572343	9453300	67	33	44	31.8
b13	Tambogrande, Provincia de Piura	Suelo quemado	572330	9453269	67	33	45	42.4

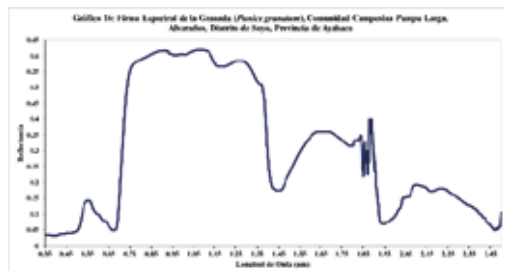
Es importante resaltar que, las especies vegetales de la Tabla 1, se identificaron con el nombre común que utilizan los pobladores de la zona muestral de estudio; sin embargo, cada una de estas especies vegetales son identificadas con un nombre científico, tales como: algarrobo (*Prosopis pallida*), angolo (*Pithecellobium multiflorum*), ceibo (*Ceiba trichistandra*), faique (*Acacia macrantha*), frijolillo (*Senna spectabilis*), hualtaco (*Loxopterygium huasango*), palo santo (*Bursera graveolens*), sapote (*Colicodendron scabridum*), faique (*Acacia macracantha*), palo verde (*Parquinsonia aculeata*), grama (*Paspalum bonplandianum*), cadillo (*Cenchrus echinatus*), manito de ratón (*Coldenia paronychoides*), jabolillo (*Cucumis dipsaceus*), aroma (*Acacia huarango*), charamusco (*Encelia canescens*), overo (*Cordia lutea*), bichayo (*Capparis ovaleifolia*), satuyo (*Capparis prisca*), margarito (*Capparis eucalyptifolia*), charán (*Caesalpinia paipái*), porotillo (*Capparis eucalyptifolia*), borrachera (*Ipomoea carnea*), cardo (*Armatocereus cartwrightianus*), añalque (*Coccoloba ruiziana*), guayacán (*Tabebuia chrysantha*), chaquiro (*Pithecellobium excelsum*), ceibo (*Ceiba trichistandra*), pata de vaca (*Bauhinia aculeata*), huarapo (*Terminalia valverdae*), barbasco (*Piscidia carthagenensis*), almendro (*Geofroea striata*), polo (*Cochlospermum vitifolium*), pego (*Pisonia macracantha*), entre otras.

Asimismo, en la figura 10, se puede observar la firma Espectral de cada una de las especies vegetales identificadas y recogidas en la zona muestral cuenca baja del río Chira, región Piura, las cuales se han clasificado consecutivamente desde (a1) hasta (a27).

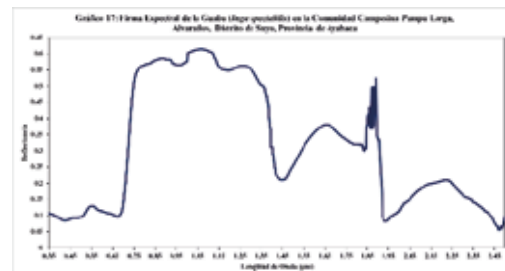
Figura 10

Firma Espectral de especies vegetales identificadas y recogidas en la zona muestral cuenca baja del río Chira, región Piura

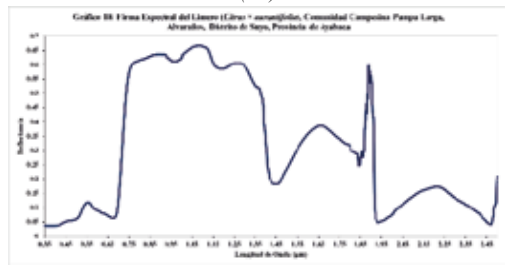




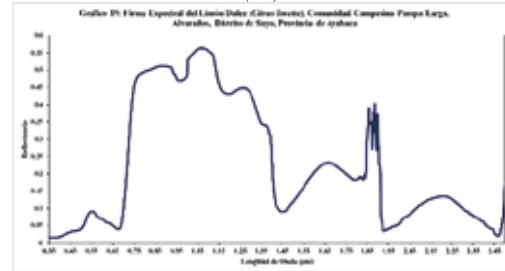
(a15)



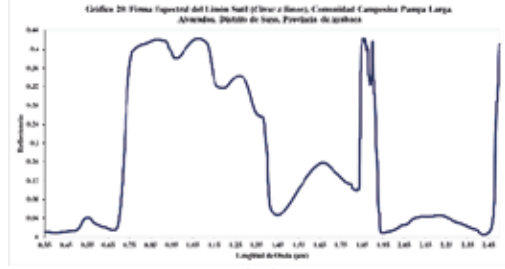
(a16)



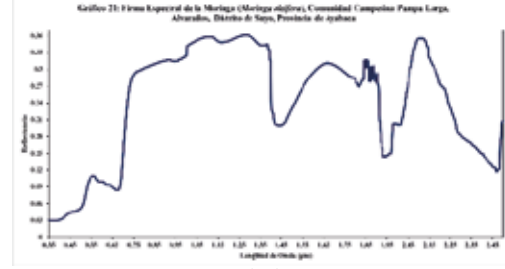
(a17)



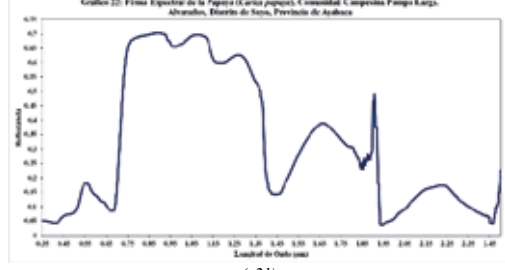
(a18)



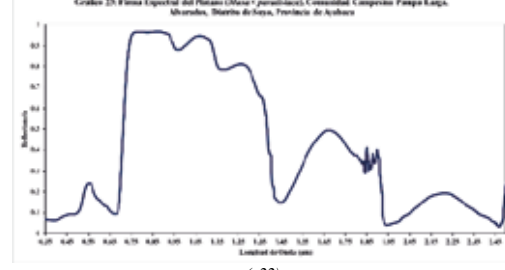
(a19)



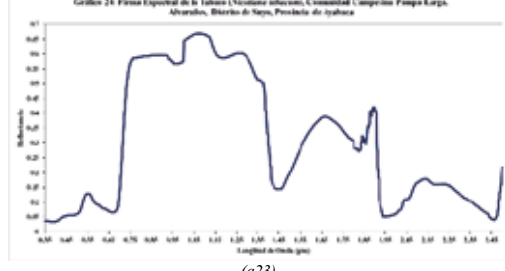
(a20)



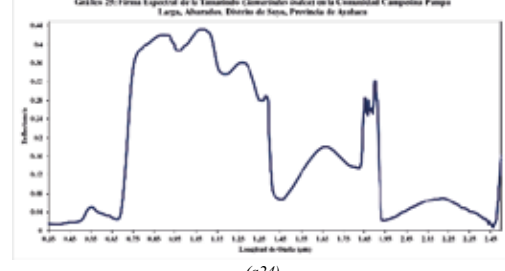
(a21)



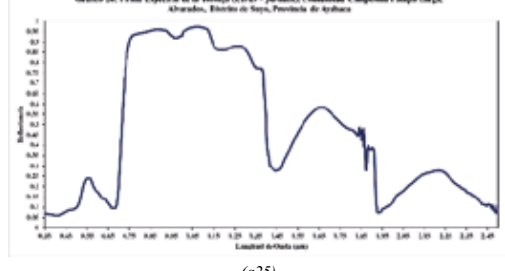
(a22)



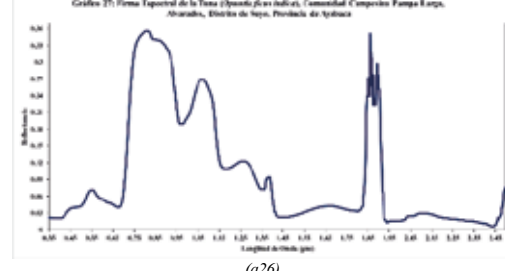
(a23)



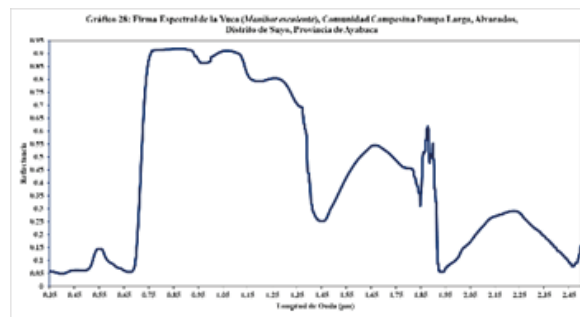
(a24)



(a25)



(a26)



En el caso del gráfico (a1), muestra la Firma espectral del bosque seco en la comunidad campesina Pampa Larga, Alvarados, del distrito de Suyo Provincia de Ayabaca. Cabe indicar que, la firma espectral corresponde al barrido de toda la cobertura espacial del suelo conteniendo variedades de vegetación de bosque seco.

El análisis espectral de las especies vegetales realizado a partir de medidas radiométricas de reflectividad, o firmas espectrales con el espectrorradiómetro FieldSpec4, permiten determinar cobertura espacial y temporal con el uso de imágenes de satélite. Esto es útil para comprender con mayor precisión, la información de datos satelitales, así como la reducción de errores, en relación con la complejidad del terreno y la diferencia de tiempo entre el trabajo de campo y las fechas de adquisición de imágenes de satélite (Aldana et al., 2020).

Asimismo, la cubierta vegetal es un medio heterogéneo compuesto de hojas, tallos, troncos, suelos, agua, entre otros elementos sobre la superficie de la tierra, todos ellos representados por sus respuestas espectrales respectivas. Además, hay que tener en consideración que las plantas son seres vivos sujetos a cambios estacionales, climáticos e incluso a enfermedades y que estos cambios afectan a su reflectividad. Por estas razones el estudio del comportamiento espectral de la vegetación es muy complejo.

De esta manera, se tiene que, la vegetación sana tiene una reflectividad baja en el visible, aunque con un pico en el color verde debido a la clorofila. La reflectividad de la vegetación es muy alta en el infrarrojo próximo debido a la escasa absorción de energía por parte de las plantas en esta banda. En el infrarrojo medio hay una disminución especialmente importante en aquellas longitudes de onda en las que el agua de la planta absorbe la energía.

Por otro lado, la vegetación enferma presenta una disminución de la reflectividad en las bandas infrarrojas y un incremento en el rojo y azul. Se observa también que, la reflectividad de una planta depende de su contenido en agua. En tal sentido, cuando el contenido de agua aumenta disminuye la reflectividad ya que aumenta la absorción de radiación por parte del agua contenida en la planta.

Por tal motivo, la construcción de una preliminar base de firmas espectrales de especies vegetales en la región Piura, brinda herramientas preliminares necesarias para la formulación e implementación posterior de un proyecto integral que contenga diferentes fases y componentes orientada a proporcionar datos, tecnología y herramientas de aplicación más reciente que conlleven a mejorar de manera continua y sostenible la gestión y protección de ecosistemas, por ejemplo, de bosque seco.

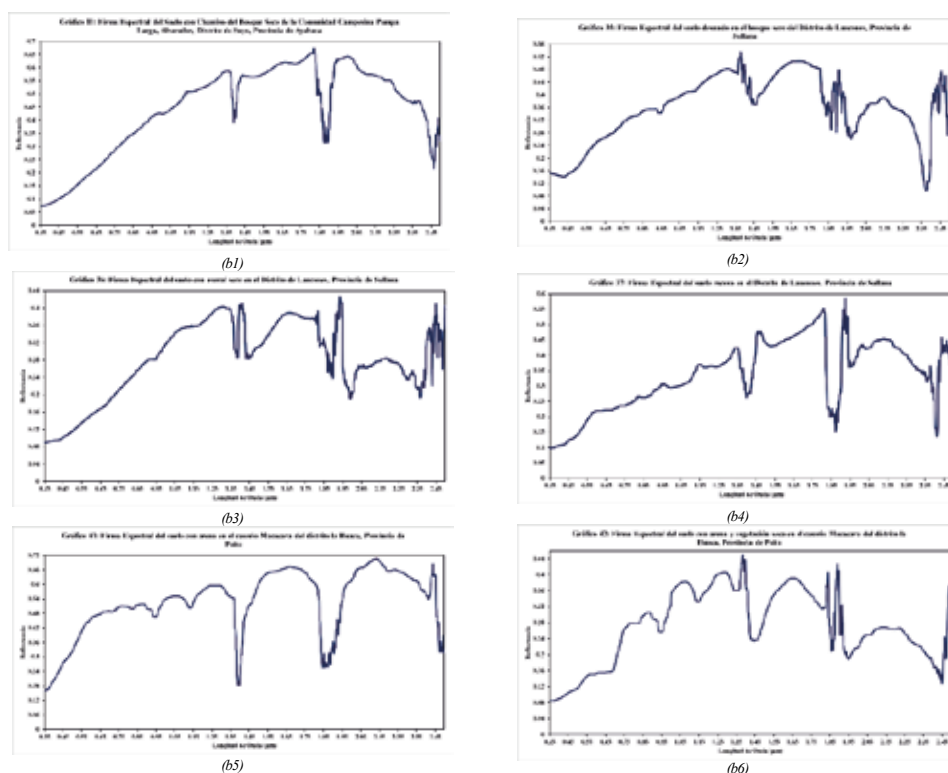
En un enfoque espectral, lo que se ve son esencialmente las huellas dactilares (firma espectral) de los diferentes objetos de estudio, que se pueden utilizar para identificarlos y clasificarlos en las imágenes de satélite, por lo que se podría identificar y clasificar el tipo de vegetación de bosque seco con sus diferentes variabilidades en la región Piura. Una firma espectral es en realidad única para una característica en particular, dado que, se habla de características ambientales, ello conllevará a que exista variabilidad natural por lo que no será 100% único, pero eso es

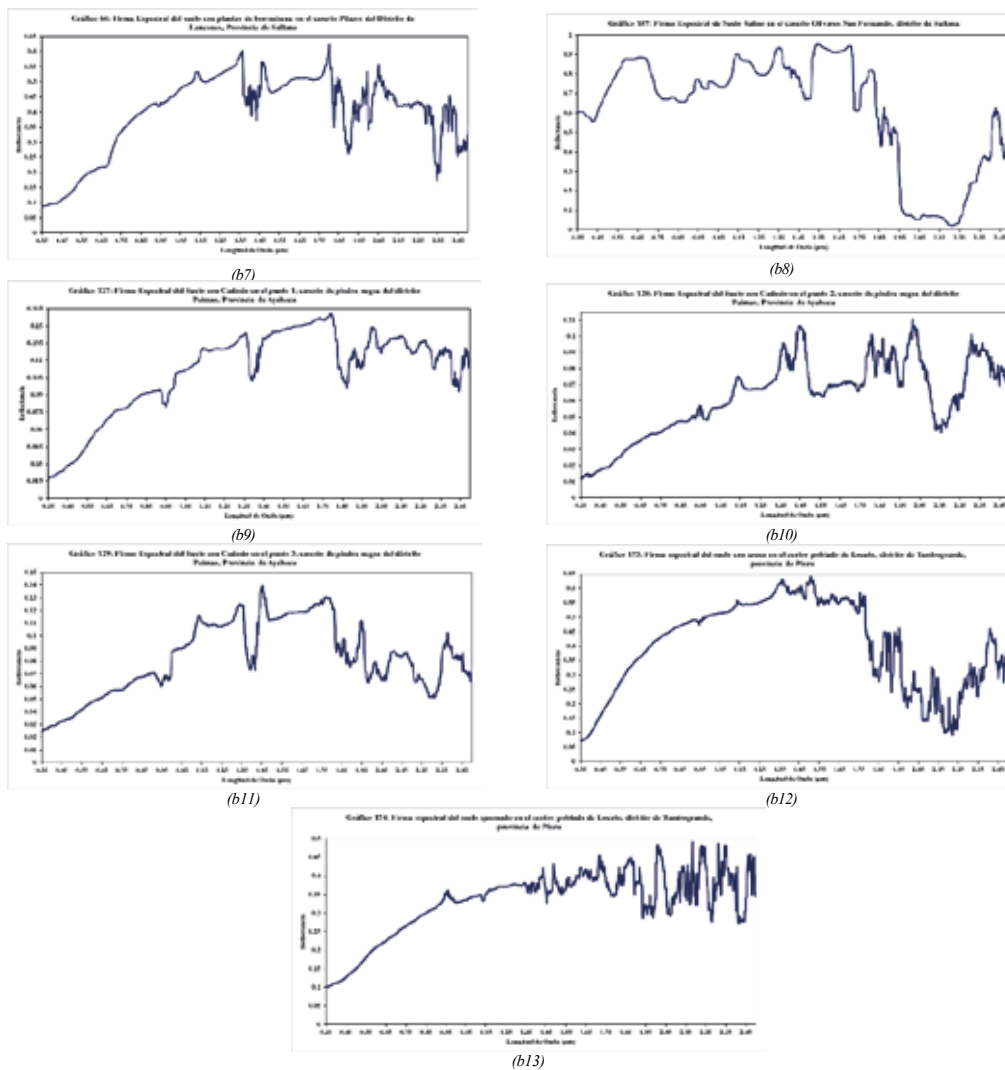
precisamente la que la hace realmente única para una característica particular dentro del rango del visible, NIR y SWIR. Las curvas de reflectancia espectral que se observan en los gráficos desde (a1) hasta (a27) de la figura 10, representa gráficamente el nivel de reflectancia en longitudes de onda discretas; mostrando niveles de absorción, emisión, reflectancia o transmisión de ese objeto para poder clasificarlo dentro de una imagen de satélite según su firma espectral. La complejidad de los problemas ambientales en los ecosistemas de bosques secos, demanda de conocimientos científicos y tecnológicos con alto grado de veracidad que permita establecer las vulnerabilidades y oportunidades características de cada zona, reducir las incertidumbres asociadas al clima y condiciones de resiliencia de dichos ecosistemas. En base a ello, se puede desarrollar metodologías de seguimiento, análisis y evaluación de los elementos biofísicos, parámetros biológicos y bioquímicos, factores, descriptores e indicadores para la caracterización de la dinámica espacial de los ecosistemas en la región y otras áreas geográficas.

Actualmente, no se cuenta con librerías espectrales históricas y de imágenes de satélite que puedan ser utilizadas por diversos usuarios potenciales relacionadas con el comportamiento espectral de la vegetación. Tal es así que, la dinámica actual de la cobertura de la tierra, uso de la tierra, detección de cambios, mapeo de variables geofísicas para índice de área foliar, contenido de clorofila foliar, contenido de agua en hojas entre otras tiene un estudio limitado; por lo que, se hace necesario ampliar dichos estudios a parámetros específicos que permitan orientar la formulación de políticas, la toma de decisiones y los procesos de soporte a las decisiones participativas, en la gestión de manera eficiente e integrada de recursos hídricos en las cuencas hidrográficas de la región Piura, especialmente en zonas de bosque seco. Con respecto a la firma espectral de suelo identificadas y recogidas en la zona muestral cuenca baja del río Chira, región Piura, se puede observar en los gráficos de la figura 11, que van desde (b1) hasta (b13), se tiene que, en la figura 11, se observa el comportamiento espectral en diferentes escalas del espectro electromagnético que representan a suelos con cadmio, suelo quemado, arena, suelo salino, suelo con vegetación seca, entre otros.

Figura 11

Firma Espectral de suelo identificadas y recogidas en la zona muestral cuenca baja del río Chira, región Piura.



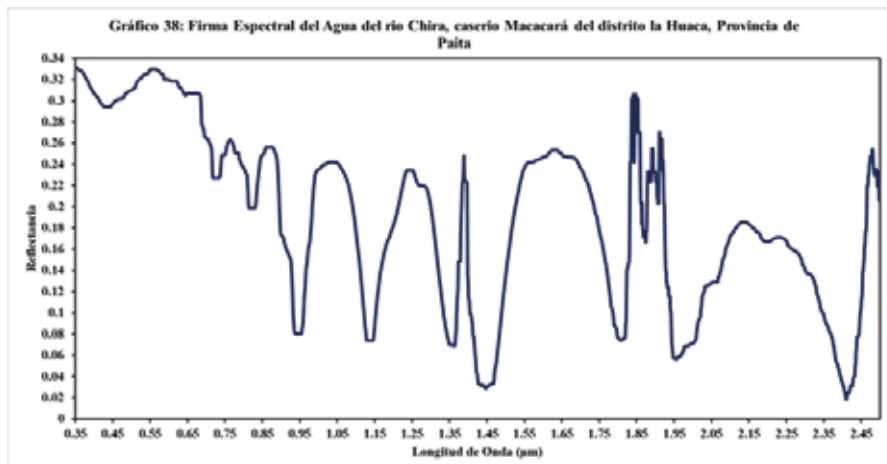


Finalmente, en lo que respecta a la firma espectral de agua identificada y recogida en la zona muestral cuenca baja del río Chira, región Piura, se puede observar la figura 12, que muestra el comportamiento espectral en diferentes escalas del espectro electromagnético que representa la reflectancia del agua del río Chira, de tal manera que ello, genere la posibilidad de determinar parámetros de calidad de agua, medidos a través de los sensores remotos empleados.

La exploración espectral que facilitan los sensores, permite desarrollar técnicas modernas de análisis que conlleven a una optimización de los recursos empleados para realizar estas tareas de tomas de muestras y posterior análisis en laboratorio.

Figura 12

Firma Espectral de agua identificada y recogida en la zona muestral cuenca baja del río Chira, región Piura



Teniendo en cuenta que, la firma espectral es la medida cuantitativa de las propiedades espectrales de un objeto en una o varias bandas espectrales, conocida también como comportamiento espectral, es importante considerar que, dicho concepto incluye la variabilidad temporal de las firmas espectrales, así como su variación en función de las condiciones meteorológicas, de las estaciones del año, y de las condiciones de iluminación. Por ello, la respuesta espectral del agua muestreada en la figura 12, depende principalmente de su pureza y de las diferentes partículas que se puedan encontrar presente en su parte superficial tales como algas, fitoplancton, entre otras.

Tal es así que, si fuera agua con un alto grado de pureza, sus propiedades de transmisión de la radiación electromagnética en el espectro visible y de absorción en el infrarrojo serían excelentes. Sin embargo, tal como se muestra en la figura existen importantes caídas de reflectancia en diversas longitudes de onda, especialmente en el infrarrojo; presentando la reflectancia un pico en el verde que va reduciéndose hasta el infrarrojo.

4. CONCLUSIONES

Con los resultados obtenidos, se determinó las firmas espectrales de especies vegetales, suelo y agua de la cuenca del río Chira, región Piura, medidos con el espectroradiómetro “FieldSpec4”; reconociendo un conjunto muestral de firmas espectrales de diferentes especies de vegetación ubicadas en diferentes puntos geográficos en la cuenca baja Chira, diferenciando por ejemplo, la firma espectral del algarrobo de Lancones con respecto al algarrobo de Caracucho–Jacanacas, Faical, Morropón; permitiendo ello construir un banco o biblioteca de firmas espectrales, las mismas que pueden ser utilizadas mediante la misma metodología de clasificación para la obtención de mapas de cobertura y uso de suelo en cualquier zona de interés. Asimismo, la falta de reflectividad en el infrarrojo permite distinguir entre áreas de tierra y agua tanto en costas como en ríos, lagunas u otros.

Al incrementarse la profundidad del agua la reflectancia desciende, en cualquier longitud de onda. Cuando el agua presenta turbidez, las consecuencias sobre la respuesta espectral van a depender del tipo de partículas en suspensión; tal es así que, cuando se trata de fitoplancton, aparecen importantes alteraciones en el verde (aumenta) y en el azul (disminuye).

AGRADECIMIENTOS

El desarrollo y culminación del presente trabajo de investigación fue posible gracias al apoyo técnico, científico, físico y financiero de la Dirección de Gestión de la Investigación de la Universidad Nacional de Frontera, Sullana, Piura, Perú. Asimismo, los autores agradecen al Laboratorio de Teledetección y energías Renovables LABTELER

de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga; Ayacucho, Perú, por su incondicional apoyo para la toma de firmas espectrales con el espectrorradiómetro FieldSpec4.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adami, M., Bernardes, S., Arai, E., Freitas, m., Shimabukuro, y., Espírito-Santo, F., Rudorff, B. y Anderson, L. (2018). Seasonality of vegetation types of South America depicted by moderate resolution imaging spectro radiometer (MODIS) time series, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Volume 69, Pp. 148-163, ISSN 1569-8432. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.02.010>
- Aldana, C., Revilla, M., Gonzales, J., Saavedra, Y., Moncada, W., & Maicelo, J. (2020). Relación de firmas espectrales para la identificación de bosque seco en imágenes de satélite Sentinel 2, cuenca baja del río Chira, Región Piura. In *Revista de Teledetección* (Issue 56, p. 147). Universitat Politècnica de Valencia. <https://doi.org/10.4995/raet.2020.14110>
- Aldana, C., Saavedra, Y., Gonzales, J., Gálvez, D., Palacios, C., Aldana, W., & Moncada, W. (2021). Spatial-temporal agricultural production of Citrus x limonand Mangifera indica, using spectral signatures and satellite images. In *Scientia Agropecuaria* (Vol. 12, Issue 4, pp. 557–570). Universidad Nacional de Trujillo. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2021.060>
- Alonso, C., & Moreno, V. (1996). Análisis multitemporal de imágenes LANDSAT TM en la cartografía de las masas de hielo y nieve aplicada a la modelización hidrológica. Asociación Española de Teledetección. Disponible en: http://www.aet.org.es/revistas/revista7/AET7_4.pdf
- ASD Inc. (2017). FieldSpec 4 Hi-Res High Resolution Spectroradiometer. <https://www.asdi.com/products-and-services/fieldspec-spectroradiometers/fieldspec-4-hi-res>
- Borole*, V. Y., Kulkarni, Dr. S. B., & Bhise, P. R. (2019). Soil Spectral Signature Analysis for Influence of Fertilizers on Two Different Crops in Raver Tahshil. In *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)* (Vol. 8, Issue 3, pp. 659–663). Blue Eyes Intelligence Engineering and Sciences Engineering and Sciences Publication - BEIESP. <https://doi.org/10.35940/ijrte.b2640.098319>
- Borràs, J., Delegido, J., Pezzola, A., Pereira, M., Morassi, G., & Camps-Valls, G. (2017). Clasificación de usos del suelo a partir de imágenes Sentinel-2. In *Revista de Teledetección* (Issue 48, p. 55). Universitat Politècnica de Valencia. <https://doi.org/10.4995/raet.2017.7133>
- Han-ya, I., Ishii, K., & Noguchi, N. (2010). Monitoring Rice Growth Environment by Low-altitude Remote Sensing Using Spectroradiometer. In *IFAC Proceedings Volumes* (Vol. 43, Issue 26, pp. 184–189). Elsevier BV. <https://doi.org/10.3182/20101206-3-jp-3009.00032>
- Jianxi, H., Yuzhuo, H., Wei, S., Junming, L. y Dehai, Z. (2017). Mapping corn and soybean cropped area with GF-1 WFV data[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 33(7):164-170. DOI:10.11975/j.issn.1002-6819.2017.07.021
- Palamuleni, L., Annegarn, H., Kneen, M., & Landmann, T. (2007). Mapping rural savanna woodlands in malawi: a comparison of maximum likelihood and fuzzy classifiers. In *2007 IEEE International Geoscience and*

- Remote Sensing Symposium. 2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE. <https://doi.org/10.1109/igarss.2007.4423035>
- Peddle, D. R., Peter White, H., Soffer, R. J., Miller, J. R., & LeDrew, E. F. (2001). Reflectance processing of remote sensing spectroradiometer data. In *Computers & Geosciences* (Vol. 27, Issue 2, pp. 203–213). Elsevier BV. [https://doi.org/10.1016/s0098-3004\(00\)00096-0](https://doi.org/10.1016/s0098-3004(00)00096-0)
- Van Dijk, D., Shoaie, S., van Leeuwen, T., & Veraverbeke, S. (2021). Spectral signature analysis of false positive burned area detection from agricultural harvests using Sentinel-2 data. In *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* (Vol. 97, p. 102296). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102296>
- Vasava, H. B., & Das, B. S. (2022). Assessment of Soil Properties using Spectral Signatures of Bulk Soils and Their Aggregate Size Fractions. In *Geoderma* (Vol. 417, p. 115837). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115837>
- Zhao, H., Wang, Y., Liu, S., Li, K., & Gao, W. (2019). Spectral reflectance characterization and fiber type discrimination for common natural textile materials using a portable spectroradiometer. In *Journal of Archaeological Science* (Vol. 111, p. 105026). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2019.105026>
- Zeferino, L. B., Souza, L. F. T. de, Amaral, C. H. do, Fernandes Filho, E. I., & Oliveira, T. S. de. (2020). Does environmental data increase the accuracy of land use and land cover classification? In *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* (Vol. 91, p. 102128). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102128z>