Inicio página
Investigadores
Resumen gráfico
Descripión
Objetivos
Marco conceptual
Resultados
Agradecimientos

Fraccionamiento de las Propiedades Hiperespectrales de Sistemas Edafológicos para el Diagnóstico de la Fertilidad de los Suelos

Financiación

- Proyecto C.I. 71263 de la Universidad del Valle.
- Convocatoria 848 - Programa de Estancias Postdoctorales en Entidades del SNCTeI 2019 del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (Minciencias).

PDF

Grupo de Investigación

Grupo de Investigación en Ciencias con Aplicaciones Tecnológicas (GI-CAT)
Departamento de Química
Facultad de Ciencias Naturales y Exactas
Universidad del Valle, Cali - Colombia

Visitar Gruplac

Citación

Ramírez-Rincón J.A., Palencia M., Afanasjeva N., Benítez L.N., Combatt E.M. Fraccionamiento de las Propiedades Hiperespectrales de Sistemas Edafológicos para el Diagnóstico de la Fertilidad de los Suelos. Proyecto C.I. 71263 de la Universidad del Valle. 2021. AFICAT(2021). Doi: 10.34294/aficat.21.08.002

Investigadores

Dr. Manuel Palencia Luna

Químico de la Universidad de Córdoba (Colombia) y Doctor en Ciencias Químicas de la Universidad de Concepción (Chile).
Profesor Titular del Departamento de Química de la Universidad del Valle (Colombia), adscrito al área de Fisicoquímica.

Google Scholar

Dr. Natalia Afanasjeva

Química del Petróleo y Compuestos de Alto Peso Molecular de la Universidad Estatal de Tomsk (Rusia), especialista en Cromatografía de Gases y Líquidos del Instituto de Separaciones Cromatográficas Dzershinsk Gorkyi, Magíster en Química de la Universidad Estatal de Tomsk, y Doctora de la Academia estatal del Gas y Petróleo (Rusia).
Profesora Titular del Departamento de Química de la Universidad del Valle (Colombia), adscrita al área de química orgánica.

Google Scholar

Dr. Luis Norberto Benítez Vásquez

Químico y Magíster en Ciencias Químicas de la Universidad del Valle (Colombia), y Doctor de Escuela Politecnica Federal de Lausanne (Suiza).
Profesor Asociado del Departamento de Química de la Universidad del Valle (Colombia), adscrito al área de química analítica.

CvLac

Dr. Jorge Andrés Ramírez Rincón

Licenciado en Física de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Colombia), Magíster y Doctor en ciencias en la especialidad de física aplicada del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN (México).
Posdoctorante del Departamento de Química de la Universidad del Valle (Colombia).

Google Scholar

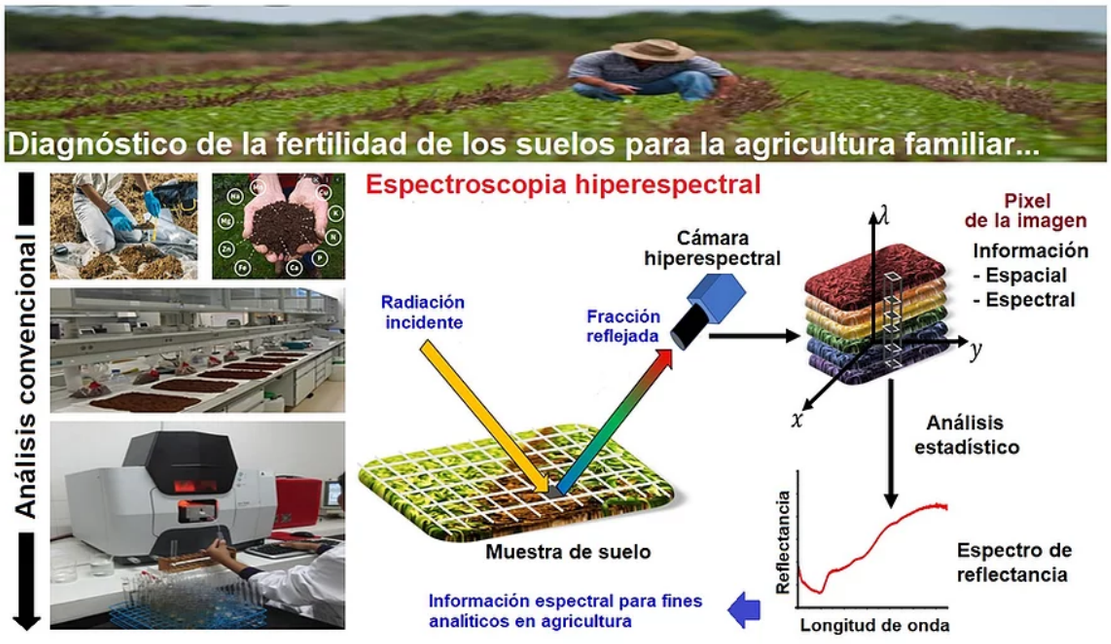
Dr. Enrique Miguel Combatt Caballero

Ingeniero Agrónomo y Especialista en Manejo de Suelos y Aguas de la Universidad de Córdoba (Colombia), Magíster en Agronomía con énfasis en suelos de la Universidad Nacional de Colombia - Sede Palmira (Colombia), y Doctor en Agronomía con énfasis en suelos y nutrición vegetal de la Universidad Federal de Viçosa (Brasil).
Profesor Títular del Departamento de Ingeniería Agrícola y Desarrollo Rural de la Universidad de Córdoba (Montería).

Google Scholar

Fraccionamiento de las Propiedades Hiperespectrales de Sistemas Edafológicos para el Diagnóstico de la Fertilidad de los Suelos

Resumen gráfico



Descripción

PROBLEMÁTICA Y JUSTIFICACIÓN

Los suelos son un ente de importancia para el desarrollo del país, tanto desde una dimensión ambiental como productiva. Sin embargo, la débil implementación de tecnologías de producción pone en riesgo su integridad ecosistémica, al igual que restringen su potencial productivo. Lo anterior va ligado al adecuado conocimiento de estos, en especial para la producción agrícola, donde se requiere conocimiento de su estatus nutricional para la optimización de las condiciones de producción en etapas clave como la fertilización. De este modo, para el fortalecimiento del sector agrícola, y pecuario si se consideran la necesidad de pastos para la ganadería, algunos aspectos de vital importancia son: desarrollar estrategias basadas en tecnología de base científica que permitan el aumento de la producción y la reducción de los costos de las cosechas del mediano y pequeño productor, e implementar tecnologías que generen un uso eficiente de fertilizantes con lo que a su vez se contribuye con la creación de sistemas productivos eco-amigables. Sin embargo, como también fue indicado previamente, estas tecnologías deben replicar la capacidad de los procedimientos existentes, pero deben ser superiores en cuanto a factores como la accesibilidad, costos, ventajas adicionales e impacto.

Los diferentes datos obtenidos de fuentes como el banco mundial indican que el costo de fertilizantes en la mayoría de los cultivos tiene una participación importante en los costos de producción agrícola a nivel mundial; Además, el consumo de fertilizantes por hectárea de tierra cultivable sigue en aumento de una manera desproporcionada en relación con los rendimientos de producción, como es el caso general de América Latina y el Caribe, esto sumado a los numerosos casos de contaminación por sobre fertilización, son consecuencias de un manejo poco eficiente de fertilizantes. Por otro lado, los diagnósticos de fertilidad son fundamentales en el manejo eficaz de los problemas nutricionales relacionados con el suelo, actualmente estos diagnósticos implican la medición analítica de varios parámetros mediante diferentes técnicas de análisis que de manera general implican etapas de muestreo, extracción y medición, los resultados obtenidos deben ser además interpretados bajo el estudio del campo de manera que los valores de análisis tengan validez agronómica; por lo tanto, el diagnostico de fertilidad del suelo es un trabajo que toma bastante tiempo, es laborioso y representa costos muy elevados [1-5]. Además, los métodos tradicionales de rutina para el análisis de suelos, pueden considerarse poco amigables para el medio ambiente, en la medida que no se ajustan a principios de la química verde en pro de la sostenibilidad, dado a que son métodos "sucios" que consumen gran cantidad de reactivos generando a su vez una cantidad apreciable de desechos químicos de diferente naturaleza y toxicidad.

Debido a que el análisis hiperespectral permite explorar diferentes regiones del espectro para fines analíticos, mediante técnicas avanzadas de análisis es posible correlacionar la respuesta del hiperespectro con el estatus nutricional de los suelos para su aplicación en agricultura. Además, una ventaja inherente es que esta técnica permite la captura de información digital que puede ser trasmitida a un sistema de análisis remoto donde la información es procesada y las conclusiones retrasmitidas al agricultor, para tomar las acciones pertinentes en lo que respecta a la fertilización. Un sistema de análisis de suelos mediante teledetección hiperespectral y remota puede visualizarse como un sistema de dos actores: el usuario quien es quien registra la información y, el analizador quien es el ente que recibe la información, la procesa, la analiza y devuelve los resultados al usuario con recomendaciones agrícolas. Pero, además, el analizador suministra sus conclusiones a los entes territoriales que obtienen información actualizada y periódica de los agroecosistemas bajo análisis, para un adecuado direccionamiento de políticas y recursos. En el contexto expuesto, este proyecto busca avanzar en un sistema integral de asistencia técnica agropecuaria de teledetección remota departamental, siendo pionero en su tipo a nivel nacional e incluso internacional en cuanto alcance y población objetivo.

Aunque el análisis hiperespectral ha sido usado para el estudio de los suelos desde un punto de vista estructural y composicional de zonas, su uso para el diagnóstico de la fertilidad de los mismos de manera sitio-específica y puntual es limitado. Además, en condiciones controladas, los perfiles espectrales son la respuesta a cambios de vibración en los diferentes grupos de átomos que forman las moléculas y los cristales. La información espectral de los suelos capturada entre los 400 y 2.500 nm es usualmente recopilada en bases de datos o librerías espectrales. Sin embargo, el procesamiento de la información de estas librerías espectrales se ha limitado a la correlación entre características del suelo en el perfil espectral, pero los métodos de clasificación de imágenes multiespectrales e hiperespectrales ofrecen una gran herramienta para extraer información de los perfiles espectrales de suelos, y por lo tanto son una promisoria alternativa para un análisis cuantitativo de la fertilidad de los suelos.

Es claro que la extracción e interpretación directa de la información espectral es uno de los principales retos que se plantea en esta propuesta, y de ello dependerá en gran medida la capacidad de poder realizar diagnósticos precisos y exactos que den cuenta del estado nutricional real del suelo [6-9]. En este sentido, se parte de la hipótesis que el fraccionamiento de los componentes del suelo producirá un 'fraccionamiento' en la respuesta del hiperespectro y, en consecuencia, información más exacta de su composición. La cual, para aspectos como materia orgánica, CIC, textura, densidad aparente, humedad y pH, pueden traducirse en información directamente relacionada con el estatus de fertilidad agrícola.

Bibliografía

[1] Platero C., Apuntes de Visión Artificial. Universidad Politécnica de Madrid, 2008, 11-32.

[2] González A., Vargas I., Análisis de imágenes hiperespectrales. Revista de Ingeniería, 2013, 9(35):14-17.

[3] Mejía J., Apuntes del Procesamiento Digital de Imágenes. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, 2005, 3 -5.

[4] Montesinos R., Especificación cromática de gamas de colores usadas en la industria del calzado. Universidad de Alicante, 2003, 13-27.

[5] Pacheco G., Diseño e implementación de un sistema de monitoreo de color in situ y en tiempo real en un equipo de extracción de jamaica utilizando una cámara CCD. Universidad Tecnológica de la Mixteca, 2014, 21-36.

[6] Alvarado J., Procesamiento y Análisis de Imágenes Digitales. Escuela de Ingeniería Electrónica, Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2012, 31-33.

[7] Trueba S., Análisis de imágenes multiespectrales aéreas de vegetación. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación, 2017, 14-24.

[8] PROCISUR. AGRICULTURA DE PRECISIÓN: Integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable. Programa Cooperativo para el Desarrollo Tecnológico Agroalimentario y Agroindustrial del Cono Sur, 2006.

[9] SEF, SOCIEDAD ESPAÑOLA DE FITOPATOLOGÍA. Publicación oficial No 3. 2018.

Objetivos

OBJETIVO GENERAL

Estudiar las propiedades de sistemas edafológicos mediante el fraccionamiento hiperespectral para el diagnóstico de la fertilidad de los suelos.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar la respuesta hiperespectral de fases constitutivas del suelo: solución del suelo, fase sólida y fase humificada.
- Caracterizar la respuesta hiperespectral de muestras de suelos en términos de su aptitud agrícola.
- Evaluar la caracterización espectral de suelos a nivel de campo.

Marco conceptual

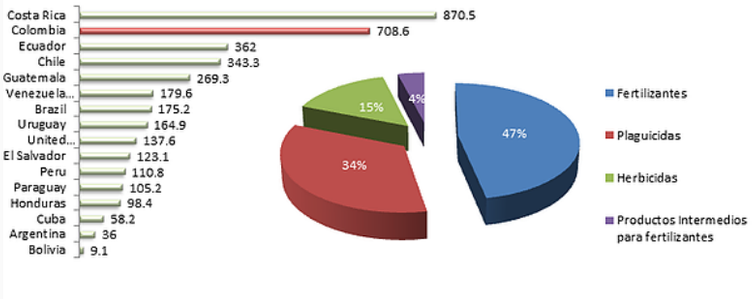
FERTILIDAD DEL SUELO

GENERALIDADES

El suelo puede ser considerado como un medio natural del cual las plantas obtienen los nutrientes y micronutrientes esenciales para un adecuado desarrollo. Bajo un punto de vista químico y agrícola, el sistema suelo, también puede ser considerado como una dispersión de tres fases (solida, líquida y gaseosa) que posee 5 componentes principales: materia mineral (arcillas), materia orgánica, agua, aire y organismos vivos; los dos primeros componentes (arcillas y materia orgánica) conforman la fracción sólida del suelo y poseen los grupos funcionales necesarios para la retención y liberación de nutrientes. La disponibilidad de estos nutrientes depende entonces de la velocidad de liberación, la cantidad, la forma y el pH en que se encuentren. Así mismo, la fertilidad del suelo se refiere a la capacidad que tiene el suelo para suministrar los macro- y micronutrientes que las plantas requieren en las proporciones y condiciones adecuadas. Por lo anterior, es claro que una de las líneas hacia las cuales debe dirigirse el estudio del suelo consiste en la consideración de sus diversas propiedades, variación de componentes y disponibilidad de nutrientes en función de la producción agrícola [1-2].

Por otro lado, como lo demuestran estudios publicados por la Superintendencia de Industria y comercio (SIC) en el caso de Colombia, el costo de inversión en fertilizantes constituyen el porcentaje más elevado en los costos de producción agrícola con un 47 % del costo total; así mismo, el reporte oficial del Banco Mundial hasta el 2014 representado en la figura 1 ubica a Colombia como el noveno país del mundo y segundo de la región con mayor consumo de fertilizantes, además, numerosos estudios señalan que las prácticas agrícolas inadecuadas, la fertilización insuficiente y sobre fertilización son las principales causas de la degradación que actualmente padecen muchas tierras cultivables. Lo anterior deja claro que el diagnóstico de fertilidad del suelo es fundamental tanto para una correcta evaluación del estado nutricional como para realizar una fertilización próxima a las necesidades reales de la planta, influyendo directamente en el costo y consumo adecuados de fertilizantes, y los costos de producción de los cultivos [3-4].

Figura 1. Consumo de fertilizantes en el continente en kg/ha; % de inversión en productos agrícolas en costo total de producción.



MÉTODOS PARA EL DIAGNÓSTICO DE FERTILIDAD DE SUELOS

El diagnóstico de fertilidad, lo constituye un conjunto de análisis químicos acerca del estado nutricional del suelo que deben ser complementados con calibraciones de la zona cultivable; los métodos de análisis químico necesarios para realizar un diagnóstico de fertilidad de suelos pueden presentar variaciones, pero de manera general estos suelen llevarse a cabo de dos formas: una primera forma, es midiendo una característica asociada a la fertilidad del suelo (pH, conductividad eléctrica (CE), materia orgánica fácilmente oxidable, CIC y porcentaje de saturación de bases) y una segunda manera, midiendo los índices de disponibilidad de nutrientes en el suelo, que pueden ser fracciones solubles, extraíbles, fijadas o mineralizables de diferentes elementos esenciales, por ejemplo; fósforo extraíble, azufre extraíble, calcio, magnesio, potasio, sodio y aluminio solubles e intercambiables, como también, microelementos (B, Mo, Cu, Fe, Mn y Zn) [3].

La etapa de análisis consiste en la extracción de la fracción disponible del elemento esencial mediante el uso de soluciones químicas y su posterior medición por medio de procedimientos analíticos adecuados, sin embargo, para que estos resultados tengan relevancia agronómica, deben ser integrados a factores externos del entorno, como el clima y tipo de cultivo; es decir, una vez se obtiene el resultado analítico, se estudia el rendimiento del cultivo al nivel de disponibilidad determinado y la capacidad de respuesta al elemento que ha sido analizado [2, 5-6]. Así, por ejemplo, la determinación del pH se realiza principalmente por el método potenciométrico convencional teniendo en cuenta las siguientes categorías: suelos extremadamente ácidos (≤4,5) <4.5), muy fuertemente ácidos (4,6-5,0), fuertemente ácidos (5,1-5,5), moderadamente ácidos (5,6-6,0), débilmente ácidos (6,1-6,5) y categorías de suelos alcalinos (≥ 7,6). Además, se ha definido el rango entre 5,5 y 7,5 como el pH de suelos con aptitud agrícola, de manera similar para la CE se usan métodos conductimétricos que permiten correlacionar las magnitudes obtenidas con el contenido de sales solubles en los suelos; para el fósforo extraíble se emplea el método de Olsen y se han reportado disponibilidades desde 5,0 mg/kg como muy bajas hasta 30,1 mg/kg como muy altas; la determinación de bases de intercambio (Ca, Mg, Na y K) y microelementos se realiza regularmente por espectroscopia de absorción atómica usando diferentes soluciones extractoras como el acetato de amonio y sustancias para la eliminación de interferencias. El acetato de amonio también se usa para la determinación de la CIC mediante titulación del amonio en exceso con formaldehido, y el ácido dietilen-tri-amino penta-acético (DPTA) para los microelementos. Finalmente, para la MO suele usarse el método de Walkley Black. No obstante, es claro que otras etapas previas como el muestreo y el pretratamiento de las muestras son críticas en la exactitud del resultado y deben ser tenidas en cuenta para una correcta recomendación de fertilizantes [7-9].

Bibliografía

[1] Navarro S., Navarro G. Química agrícola: El suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal, segunda edición, Mundi-prensa, Barcelona, 2003.

[2] Weil R., Brady C. The Nature and Properties of Soils, quinceava edición, Pearson, 2017.

[3] Sposito G. The chemistry of soils, Oxford University Press, New York, 2008.

[4] The World Bank, World Development Indicators: Agricultural inputs, The world Bank Group, 2017.

[5] Superintendencia de Industria y Comercio (SIC), Estudio sobre fertilizantes en Colombia, Grupo de estudios económicos, 2013.

[6] Sanchez A., Couto W., Buol S.W. The fertility capability soil classification system: Interpretation, applicability and modification, Geoderma, 1982, 27:283-309.

[7] Ahmed N.E. Factors affecting cation exchange capacity of soils, FAO, Roma, 2001.

[8] Villarroel R.B. Diagnostico de la fertilidad del suelo, Instituto de Investigaciones Agropecuarias Centro Regional de Investigación Remehue, 2000.

[9] Instituto Geografico Agustin Codazzi (IGAC), Métodos analíticos del laboratorio de suelos. VI Edición. Bogotá, Subdirección de Agrología, 2006.

ANÁLISIS HIPERESPECTRAL

GENERALIDADES

La teledetección hiperespectral ha sido utilizada por físicos y químicos durante mucho tiempo para identificar materiales y su composición, en el campo de la geología se emplea para cartografiar la distribución de minerales. Mediante esta técnica pueden ser detectadas características de absorción o zonas de absorción debidas a diferentes compuestos o elementos químicos que se encuentran en el material estudiado. Se debe tener en cuenta que este tipo de análisis se ve condicionado por:

- La zona del espectro que observemos,
- La resolución espectral que empleemos, es decir el ancho de cada banda espectral usada,
- La relación señal – ruido del sensor,
- La abundancia de los que se esté midiendo,
- La fuerza con la que se presentan las características de absorción para el material en la zona del espectro que estamos observando,
- La capacidad de procesamiento de la información y
- Efectos del entorno.

Las Imágenes Espectrales son generadas por instrumentos de teledetección ópticos y no ópticos, con cientos de capas superpuestas de imágenes monocromáticas, una por cada longitud de onda (λ) que se haya muestreado y que se combinan formando un hipercubo de datos de tres dimensiones, que contienen información espectral y espacial bidimensional. El principio básico para la utilización de técnicas de análisis de este tipo de imágenes es que todo material debido a su composición química y a su estructura física intrínseca reacciona de una forma específica frente a la radiación, ya sea reflejando parte de ésta en las diferentes longitudes de onda, absorbiendo, dispersando o emitiendo.

Por otro lado, los sensores espectrales reciben la radiación electromagnética y la convierte en señales eléctricas, para luego representarlas por medio de valores numéricos o valores radiométricos en estructuras de matrices compuestos por píxeles para cada banda espectral [1]. Los sensores que permiten adquirir este tipo de datos se conocen como espectrómetros, los cuales pueden ser pasivos o activos. Los sensores pasivos corresponden principalmente a cámaras hiperespectrales que captan los fotones sin emitir energía propia del sensor, utilizando fuentes de energías como el sol en el caso de la teledetección o luz artificial para aplicaciones más supervisadas en laboratorio. Mientras los activos emitirán energía propia [1-2].

Para el análisis de imágenes hiperespectrales es necesario entender algunos parámetros como la resolución espacial, la resolución espectral y la resolución radiométrica. Además, la resolución espacial está definida por el tamaño de pixel, el cual dependerá directamente de la distancia entre el sensor y la muestra y del campo de visión instantáneo (IFOV por sus siglas en inglés) que corresponde al ángulo del lente. En teledetección la resolución espacial de un sensor puede ser de 10 m, mientras que para aplicaciones a pequeña escala la resolución espacial es menor a 1 mm. La resolución espectral se determina según el número de bandas espectrales que detecta el sensor. Mientras mayor sea el número de bandas, mayor es la cercanía entre estas, por lo tanto, mayor es la resolución de los espectros que entrega el sensor. Los sensores hiperespectrales, al tener más de 100 bandas, entregan espectros sinuosos en los cuales no solo es posible detectar la presencia de una absorción, como en el caso de los sensores multiespectrales, sino que también la forma, simetría, profundidad, entre otras propiedades de estas zonas de absorción. Por otro lado, la resolución radiométrica se define por el número de bits, los cuales representan numéricamente la cantidad de energía electromagnética reflejada y captada por el sensor, la cual tiene un valor para cada banda espectral de cada píxel que compone una imagen hiperespectral. Este parámetro define la sensibilidad del sensor para detectar diferencias leves de energía electromagnética, por lo que a mayor resolución radiométrica mayor es la capacidad para discriminar cambios sutiles de energía [2].

La obtención de la información espectral se debe a la energía reflejada por un cuerpo como resultado de la interacción con los constituyentes del cuerpo. Esta energía resulta principalmente de la interacción de cuatro factores: i) contenido de materia orgánica; ii) humedad del suelo; iii) contenido de minerales, y iv) textura [3]. La respuesta espectral del suelo es compleja de obtener por medio de sensores espectrales debido al efecto pantalla que provoca la cubierta vegetal, es por ello que para obtener información de este recurso se debe analizar las anomalías que se puedan detectar en la cubierta vegetal, ya que cuando se presenta suelo desnudo, tiende a tener un comportamiento espectral mucho más uniforme dando como resultado una curva espectral más plana. En la actualidad, el uso de espectroscopía para estudiar las propiedades del suelo se ha enfocado en correlaciones para diferentes longitudes de onda en el perfil espectral, como es el caso de Demattê et al. [4], en donde se obtuvo una buena correlación a incrementos de calcio y potasio para las longitudes de onda de 760-900, 2.080-2.350, 2.350-2.500 nm para el suelo Typic Quartzipsament, y 760-900, 1.118-1.270, 1.300- 1.460, 1.550-1.750 nm para el suelo Typi Argiudoll. Estos métodos de correlación son específicos para cada tipo de suelo, y no son robustos en el caso de tener un gran número de muestras de suelo. Por este motivo resulta interesante en este estudio implementar otros métodos de análisis espectral para extraer información de imágenes satelitales, o aún mejor, sitio-especificas, multiespectrales o hiperespectrales que responden a una variabilidad espacial y espectral. En primer lugar, el modelo de redes neuronales es un método no paramétrico con alta precisión para la extracción de la información de los perfiles espectrales [5-6]. Sin embargo, este tipo de modelo es considerado como una caja negra, pues no se tiene conocimiento de los procesos dentro de la red neuronal, posee un diseño complejo en la definición de la red neuronal, y para el entrenamiento de la red neuronal se debe tener un buen número de perfiles de entrenamiento. Por otro lado, el modelo linear spectral unmixing es un modelo paramétrico que se ha utilizado para extraer información de los perfiles espectrales conformados de una mezcla de materiales. Este modelo se basa en la teoría que cada perfil espectral contiene una combinación lineal de los perfiles espectrales. Si la relación es lineal, entre mayor sea la respuesta espectral de un determinado grupo, mayor será la abundancia de este material en el perfil espectral evaluado [7-8].

Bibliografía

[1] Ayala D., Automatización del análisis de imágenes hiperespectrales para identificación de aptitud de patatas. Universidad Pública de Navarra. 2018, 17.

[2] Hanna V., Evaluación de tecnologías hiperespectrales en la caracterización mineral de yacimientos para aplicaciones geometalúrgicas: caso aplicado a mina florida, distrito minero alhué, región metropolitana, Chile. Universidad de Chile. 2017, 21-29.

[3] van der Meer F. Image classification through spectral unmixing. In: Stein A., Van der Meer F., Gorte B. (eds) Spatial Statistics for Remote Sensing. Remote Sensing and Digital Image Processing, vol 1. Springer, Dordrecht, 1999.

[4] Nanni, M. R., and J. A. M. Demattê. Spectral Reflectance Methodology in Comparison to Traditional Soil Analysis. Soil Sci. Soc. Am. J. 2006, 70:393-407.

[5] Atkinson P. M. & Tatnall A. R. L. Introduction Neural networks in remote sensing, International Journal of Remote Sensing, 1997, 18(4):699-709.

[6] Braswell B.H., Hagen S.C., Frolking S.E., Salas W.A. A multivariable approach for mapping sub-pixel land cover distributions using MISR and MODIS: Application in the Brazilian Amazon region, Remote Sensing of Environment, 2003, 87(2–3):243-256.

[7] Adams, J. B., Smith, M. O., and Johnson, P. E. Spectral mixture modeling: A new analysis of rock and soil types at the Viking Lander 1 Site, J. Geophys. Res., 1986, 91(B8):8098– 8112.

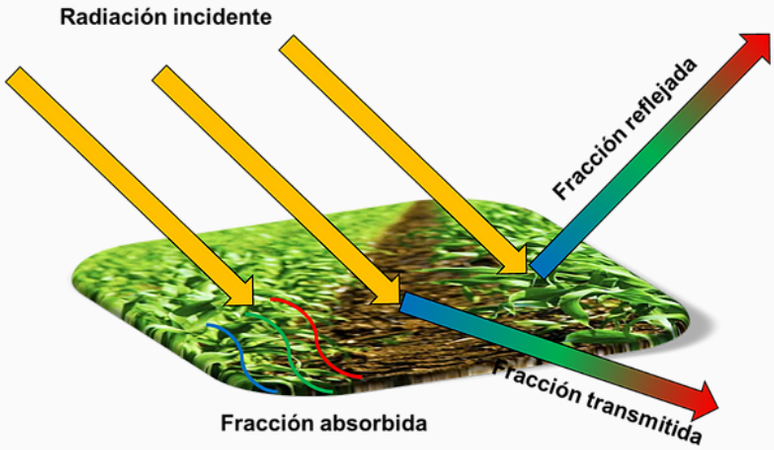
[8] Gomez C., Viscarra Rossel R.A., McBratney A.B. Soil organic carbon prediction by hyperspectral remote sensing and field vis-NIR spectroscopy: An Australian case study, Geoderma, 2008. 146(3–4):403-411.

ESPECTROSCOPIA HIPERESPECTRAL

¿QUÉ ES LA ESPECTROSCOPIA ÓPTICA?

La espectroscopia es una técnica no destructiva que se ocupa de medir y analizar la luz emitida, reflejada o absorbida por un material cuando interactúan con radiación electromagnética. Debido a la cuantización de los niveles energéticos en los átomos y moléculas que conforman la materia, la reflexión, absorción y emisión de radiación electromagnética solo ocurre en longitudes de onda específicas, dejando líneas de absorción o emisión en el espectro cuyas frecuencias son características de cada material (firma espectral). En consecuencia, esta información se puede utilizar para detectar, determinar o cuantificar la composición molecular y/o estructural de una muestra. Esta técnica compara la cantidad de luz incidente, reflejada y transmitida por un material en un rango especifico de longitudes de onda, con el fin de formar espectros conocidos como de reflectancia y transmitancia. En condiciones de no homogeneidad de la superficie, se requiere de un análisis preciso y confiable que pueda integrar técnicas de espectroscopía y de imágenes con el fin de proporcionar información espacial y espectral simultáneamente. Esta integración es la base de las técnicas de espectroscopía multiespectral e hiperespectral, las cuales se han utilizado con éxito para evaluar cualitativa y cuantitativamente entre otros, la calidad y seguridad los alimentos y la fertilidad de suelos [1,2] (ver figura 2).

Figura 2. Absorción, reflexión y transmisión de luz en una superficie.

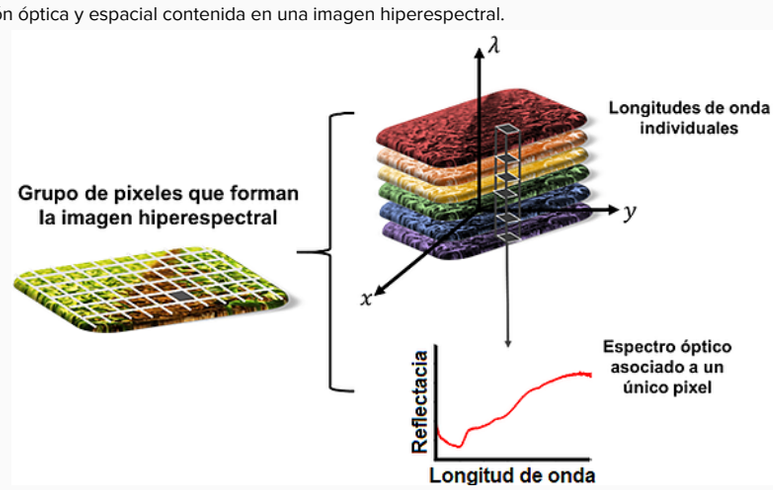


¿QUÉ ES LA ESPECTROSCOPIA HIPERESPECTRAL?

La espectroscopia hiperespectral se define como una técnica óptica mediante la cual es posible generar imágenes individuales e instantáneas utilizando una cámara, para proporcionar simultáneamente información espacial y espectral (composición química) continua de objetos distantes en varias bandas espectrales. La espectroscopía de imágenes se popularizo a partir de la década de 1970 con las mediciones espectrales de campo hechas con el sistema Landsat-1 (satélite de observación de la Tierra). A lo largo de la década de 1980 y en la de 1990 con la mejora de la tecnología informática, el Laboratorio de Propulsión a Chorro (JPL) de la NASA desarrolló el espectrómetro de imágenes aerotransportadas, utilizado principalmente para el mapeo de minerales. En 1987, JPL obtuvo las primeras imágenes con el espectrómetro visible-infrarrojo (AVIRIS), considerado el principal proveedor de información hiperespectral de alta calidad, por su capacidad de medición en el espectro solar (400 nm a 2500 nm) con una alta resolución (10 nm). Luego del éxito de estos instrumentos, recientemente se han producido mejoras significativas en los sensores utilizados, su modo de uso y la producción de datos, con el fin de adecuar estos instrumentos a sistemas terrestres (laboratorios) o aerotransportados (teledetección).

La principal ventaja de la técnica hiperespectral sobre otros métodos ópticos es el gran número (cientos o miles) de bandas espectrales disponibles, las cuales proporcionan información espacial y espectral en cada píxel de la imagen. Esta información se almacena en una matriz tridimensional (3D) también conocida como cubo de datos, cubo espectral, hipercubo o volumen espectral, formado por una dimensión espectral (longitud de onda λ) y dos espaciales (x-y), lo cual implica que cada píxel contiene un espectro de reflectancia único asociado a un punto específico sobre la superficie medida. Esta enorme cantidad de datos exige el uso de algoritmos de análisis y procesamiento adecuados que garanticen la confiabilidad de la información extraída [3,4] (ver figura 3).

Figura 3. Información óptica y espacial contenida en una imagen hiperespectral.



¿PARA QUÉ SE UTILIZA LA ESPECTROSCOPIA HIPERESPECTRAL?

En la mayoría de industrias medianas y pequeñas la evaluación y control de los productos se realizan manualmente, lo cual resulta costoso e ineficiente ya que está sujeto a errores humanos. En consecuencia, se requiere de métodos para asegurar la calidad, seguridad y autenticidad de sus productos, garantizando procesos sin contacto, no destructivos, rápidos y precisos. La tabla 1 presenta algunas aplicaciones industriales y de investigación que actualmente se le da a la espectroscopia hiperespectral, así como los sensores ópticos usados y las bandas espectrales consideradas.

Tabla 1. Lista de algunas aplicaciones de la espectroscopia hiperespectral para el análisis químico y estructural de materiales (VIS: 400-700 nm, VNIR: 400-1000 nm, NIR: 700-2500 nm)

Aplicación	*Características*	*Sensor usado*	*Bandas*	*Rango*	*Referencia*
Análisis foliar	Infección por moho	Specim IQ	86	VNIR	[5]
Calidad de alimentos	Humedad	ImSpector V10E	240	VNIR	[6]
Monitoreo de hojas	Color	Photonics Hyperspec	189	VIS-NIR	[7]
Oftalmología	Oxigeno saturado	Qimagen Retiga 4000R	50	VIS	[8]
Farmacéutica	Concentración química	Think Spectrally Roda-25	200	NIR	[9]
Enfermedades en plantas	Moho	Specim PDF V10E	220	VNIR	[10]
Daños en la piel	Color	CCD and InGaAs camera	320	VIS-NIR	[11]
Caracterización de suelos	Nitrógeno total	ImSpector N17E	256	NIR	[12]
Caracterización de suelos	Contenido de agua	Specim FX10	224	VNIR	[13]
Identificación de especies foliares	Color	IRIS Mark IV	650	VIS-NIR	[14]

¿CÓMO SE GENERA UNA IMAGEN HIPERESPECTRAL?

Una imagen hiperespectral es una imagen digital compuesta por cientos de longitudes de onda, la cual contiene información sobre las propiedades fisicoquímicas de una muestra en diferentes puntos de la superficie estudiada. La reflectancia/absorbancia espectral son características intrínsecas de cada material, a través de las cuales es posible identificar sus componentes químicos. Los sensores hiperespectrales poseen diferentes características que determinan la calidad de la imagen, las cuales están asociadas a diferentes tipos de resoluciones.

Resolución espacial

La resolución espacial está representada por puntos individuales denominados píxeles, los cuales determinan la distancia angular o lineal mínima que el sensor puede capturar en una imagen. Una alta resolución espacial significa que cada píxel representa una superficie más pequeña, aumentando así la capacidad del sensor para distinguir diferentes objetos.

Resolución radiométrica

Esta se define como la cantidad mínima de energía requerida para aumentar la información digital en un píxel. En otras palabras, es la cantidad mínima de luz que puede capturar el sensor.

Resolución espectral

La resolución espectral está asociada a la cantidad de bandas o regiones espectrales que un sensor puede capturar y almacenar en un píxel. A medida que este número aumenta, mayor será su capacidad para distinguir materiales de diferente naturaleza química. Los sensores se denominan comúnmente multiespectrales o hiperespectrales dependiendo de la cantidad de bandas disponibles. Los multiespectrales pueden diferenciar hasta 20 bandas espectrales diferentes, mientras que los hiperespectrales más de 200 bandas en las regiones UV, VIS y NIR, como el sensor HYPERION a bordo del satélite E0-1.

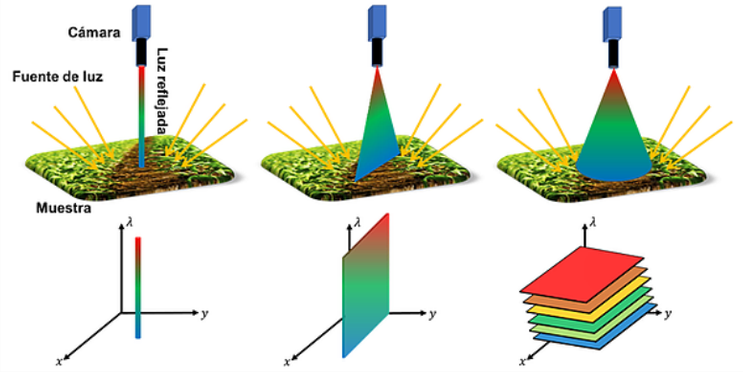
Resolución temporal

Esta es una característica asociada al análisis dinámico de superficies, en el que la muestra o el sensor están en constante movimiento. Depende del intervalo de tiempo entre la adquisición de dos imágenes consecutivas sobre un mismo punto, y es especialmente importante en la teledetección por satélite. Cada satélite tiene una órbita específica a cientos de kilómetros sobre la superficie terrestre, por lo que la adquisición de imágenes en puntos específicos toma largos períodos de tiempo y está fuertemente condicionada por varios fenómenos atmosféricos como el clima o las condiciones de iluminación.

Métodos de adquisición de datos

A través de imágenes hiperespectrales es posible analizar diferentes tipos de superficie en función de su firma espectral, siempre que la resolución espacial y espectral del sensor sea suficiente para identificar y separar respuestas ópticas individuales. Esta información se almacena en cada píxel formando un cubo de datos tridimensional, en donde se asocian dos dimensiones a la posición espacial y la otra a sus características espectrales. Las imágenes hiperespectrales se construyen mediante tres métodos diferentes según el tipo de cámara utilizada, en los cuales la información espacial y espectral se adquiere en pasos separados conocidos como escaneo de puntos (whiskbroom), escaneo de línea (pushbroom) y escaneo de área (snapshot) (figura 4).

Figura 4. Métodos de adquisición de datos de los sensores hiperespectrales.



A continuación, se da una breve descripción de los métodos de adquisición de datos.

Whiskbroom
Este método mide el rango espectral completo disponible en la cámara para un único punto por vez (un píxel), para luego moverse a otro punto sobre la muestra. Este proceso se repite hasta cubrir toda la superficie de interés formando la imagen hiperespectral completa.

Pushbroom
En este caso la información óptica adquirida en una medida corresponde a una línea completa sobre la superficie de interés (varios píxeles sobre un único eje). La muestra se mueve en cada paso sobre el eje opuesto al de medición hasta completar la imagen. Este método es comúnmente utilizado en la industria para la inspección de anomalías en diferentes productos.

Snapshot
El método de imagen instantánea recopila la información espacial y óptica completa de la superficie en una sola medición (todos los píxeles); por lo tanto, no es necesario desplazar la muestra o el sensor. Esto es ideal para monitorear grandes terrenos en períodos cortos de tiempo.

¿CÓMO SE ANALIZAN LAS IMÁGENES HIPERESPECTRALES?

A menudo se utilizan técnicas de preprocesamiento para extraer los datos ópticos contenidos en las imágenes hiperespectrales, así como para corregir efectos no deseados debido a la dispersión de la luz, variaciones de forma y el ruido aleatorio resultante de las propiedades de la muestra o de efectos instrumentales. El primer paso para una correcta interpretación es garantizar las condiciones adecuadas para capturar imágenes hiperespectrales de alta calidad. Estas condiciones pueden variar para cada tipo de muestra y dependen del modo de adquisición, tipo de iluminación, bandas espectrales a medir, velocidad de escaneo y tiempo de exposición. Las imágenes hiperespectrales suelen estar compuestas por miles de píxeles, en donde cada uno almacena características espaciales y ópticas individuales de la superficie estudiada. Toda esta información requiere de algoritmos de análisis para extraer datos espectrales, realizar calibraciones de intensidad, determinar propiedades fisicoquímicas mediante estadística multivariante, para así finalmente procesar la imagen a visualizar. Entre los métodos más comunes para el análisis de las imágenes hiperespectrales están:

Calibración radiométrica
Este proceso se encarga de normalizar la intensidad de las imágenes adquiridas, con el fin de convertir la información digital en valores reales de reflectancia. El método empleado es similar al seguido en espectroscopia regular, el cual usa como referencia la reflectancia mínima (referencia de negro) y máxima (referencia de blanco) generada por una superficie patrón. En el caso de muestras con formas irregulares, es necesario el uso de métodos de transformación adaptativos que compensen el gradiente de intensidad óptica debido a su morfología. Si las imágenes se capturan en amplios rangos espectrales, es posible la presencia de aberración cromática asociada a la posición del sensor y la lente, la cual deben también eliminarse para mejorar la calidad de la imagen [15,16].

Calibración espacial
Los métodos para el preprocesamiento de señales se usan con el propósito de eliminar ruido y mejorar la calidad de los datos ópticos extraídos. Estos incluyen filtrado, suavizado, ecualización de histograma, transformación por operaciones aritméticas y análisis por nivel de gris. Otro problema habitual es la presencia de píxeles "muertos" con valores cero o píxeles "calientes" que se suelen ver mucho más brillantes de lo que deberían. Una vez que se identifican los puntos defectuosos a lo largo de la imagen, estos se corrigen o eliminan mediante el uso de filtros, máscara binaria o valores medios de los píxeles circundantes [17].

Análisis estadístico multivariado
Debido al gran almacenamiento de información en cada píxel, es necesario administrar estos enormes cubos de datos mediante el uso de estadísticas multivariadas. El análisis de imágenes hiperespectrales requieren seleccionar el mejor subconjunto de longitudes de onda para realizar tareas específicas, debido a que en la mayoría de los casos no se requieren todas las regiones espectrales. Esto se complementa con el uso de métodos de reducción dimensional para extraer y eliminar información redundante, lo que genera una disminución sustancial del número de datos. Luego de la eliminación de píxeles anómalos, ruido electrónico y óptico, regiones espectrales no deseadas e información redundante, las imágenes hiperespectrales pueden ser utilizadas para la clasificación de materiales y extracción de propiedades fisicoquímicas.

Dependiendo del propósito, tipo de muestra en estudio y la precisión requerida, varios métodos estadísticos como la regresión multilineal, regresión de mínimos cuadrados parciales, análisis de componentes principales, análisis de discriminante, vector de soporte y red neuronal artificial, pueden ser utilizados para construir modelos de predicción que permiten correlacionar la respuesta espectral de un material con sus propiedades fisicoquímicas [18]. Este proceso ha sido ampliamente utilizado para determinar propiedades específicas de diversos materiales, pues permite descomponer datos complejos en estructuras más simples y fáciles de interpretar, las cuales mejoran la comprensión de las propiedades químicas y biológicas contenidas en un espectro óptico [19, 20].

Bibliografía

[1] Spectroscopy. Hal Hellman. (1968) United States Atomic Energy Commission Division of Technical Information, Library of Congress Catalog Card Number: 68-62126

[2] Goetz, A. F. (2009). Three decades of hyperspectral remote sensing of the Earth: A personal view. Remote Sensing of Environment, 113, S5-S16

[3] Hyperspectral imaging: A review on UAV-based sensors, data processing and applications for agriculture and forestry. Remote Sensing, 9(11), 1110.

[4] ElMasry, G. M., & Nakauchi, S. (2016). Image analysis operations applied to hyperspectral images for non-invasive sensing of food quality–a comprehensive review. Biosystems engineering, 142, 53-82.

[5] Behmann, J., Acebron, K., Emin, D., Bennertz, S., Matsubara, S., Thomas, S., ... & Rascher, U. (2018). Specim IQ: evaluation of a new, miniaturized handheld hyperspectral camera and its application for plant phenotyping and disease detection. Sensors, 18(2), 441.

[6] Lee, M., Huang, Y., Yao, H., Thomson, S. J., & Bruce, L. M. (2014). Effects of sample storage on spectral reflectance changes in corn leaves excised from the field. Journal of Agricultural Science, 6(8), 214.

[7] Lara, M. A., Lleó, L., Diezma-Iglesias, B., Roger, J. M., & Ruiz-Altisent, M. (2013). Monitoring spinach shelf-life with hyperspectral image through packaging films. Journal of Food Engineering, 119(2), 353-361.

[8] Johnson, W. R., Wilson, D. W., Fink, W., Humayun, M. S., & Bearman, G. H. (2007). Snapshot hyperspectral imaging in ophthalmology. Journal of biomedical optics, 12(1), 014036.

[9] Rosas, J. G., & Blanco, M. (2012). A criterion for assessing homogeneity distribution in hyperspectral images. Part 2: application of homogeneity indices to solid pharmaceutical dosage forms. Journal of pharmaceutical and biomedical analysis, 70, 691-699.

[10] Kuska, M., Wahabzada, M., Leucker, M., Dehne, H. W., Kersting, K., Oerke, E. C., ... & Mahlein, A. K. (2015). Hyperspectral phenotyping on the microscopic scale: towards automated characterization of plant-pathogen interactions. Plant methods, 11(1), 1-15.

[11] Randeberg, L. L., Baarstad, I., Løke, T., Kaspersen, P., & Svaasand, L. O. (2006, February). Hyperspectral imaging of bruised skin. In Photonic Therapeutics and Diagnostics II (Vol. 6078, p. 60780O). International Society for Optics and Photonics.

[12] Jia, S., Li, H., Wang, Y., Tong, R., & Li, Q. (2017). Hyperspectral imaging analysis for the classification of soil types and the determination of soil total nitrogen. Sensors, 17(10), 2252.

[13] Lim, H. H., Cheon, E., Lee, D. H., Jeon, J. S., & Lee, S. R. (2020). Classification of Granite Soils and Prediction of Soil Water Content Using Hyperspectral Visible and Near-Infrared Imaging. Sensors, 20(6), 1611.

[14] Kumar, L., Skidmore, A. K., & Mutanga, O. (2010). Leaf level experiments to discriminate between eucalyptus species using high spectral resolution reflectance data: use of derivatives, ratios and vegetation indices. Geocarto international, 25(4), 327-344.

[15] Elmasry, G., Kamruzzaman, M., Sun, D. W., & Allen, P. (2012). Principles and applications of hyperspectral imaging in quality evaluation of agro-food products: a review. Critical reviews in food science and nutrition, 52(11), 999-1023

[16] Damez, JL y Clerjon, S. (2013). Cuantificar y predecir los atributos de calidad de la carne y los productos cárnicos mediante ondas electromagnéticas: una descripción general. Ciencia de la carne, 95 (4), 879-896

[17] Leiva-Valenzuela, G. A., Lu, R., & Aguilera, J. M. (2013). Prediction of firmness and soluble solids content of blueberries using hyperspectral reflectance imaging. Journal of Food Engineering, 115(1), 91-98

[18] Burger, J., & Geladi, P. (2006). Hyperspectral NIR imaging for calibration and prediction: a comparison between image and spectrometer data for studying organic and biological samples. Analyst, 131(10), 1152-1160

[19] Peng, Y., & Lu, R. (2008). Analysis of spatially resolved hyperspectral scattering images for assessing apple fruit firmness and soluble solids content. Postharvest Biology and Technology, 48(1), 52-62

[20] Ge, Y., Thomasson, J. A., & Sui, R. (2011). Remote sensing of soil properties in precision agriculture: A review. Frontiers of Earth Science, 5(3), 229-238

Resultados

DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS RESULTADOS

(Se agregará información posteriormente)

PRODUCTOS ASOCIADOS

(Se agregará información posteriormente)

Agradecimientos

Grupo de Investigación en Ciencias con Aplicaciones Tecnológicas (GI-CAT)

(Se agregará información posteriormente)

Mindtech Reseach Group (Mindtech-RG), Mindtech s.a.s.

(Se agregará información posteriormente)

Minciencias: Convocatoria 848 - 2019

(Se agregará información posteriormente)