

Procesamiento de imágenes multiespectrales para evaluar necesidades de Nitrógeno de caña de azúcar



<https://cu-id.com/2177/v33n1e08>

Multispectral Image Processing to Assess Sugarcane Nitrogen Needs

^①Carlos Fresneda-Quintana^{1*}, ^②Arturo Martínez-Rodríguez^{II},
^③Alexander Laffita-Leyva^{II}, ^④Odalys Zamora-Díaz^{III}

¹Universidad de Cienfuegos “Carlos Rafael-Rodríguez”, Cienfuegos, Cuba.

^{II}Universidad Agraria de La Habana, Facultad de Ciencias Técnicas, San José de las Laja, Mayabeque, Cuba.

^{III}Universidad de Ciencias Médicas de Cienfuegos “Raúl Dorticós-Torrado”, Cienfuegos, Cuba.

RESUMEN: El crecimiento poblacional ha derivado en una demanda exponencial de productos agrícolas, para cubrir esta demanda se requiere mejorar la gestión y lograr un uso eficiente de recursos sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas, en particular los agrícolas. Una de las tecnologías que facilitan estas tareas es la agricultura de precisión (AP), que se enfoca en la optimización de recursos e insumos basado en la compilación de geo información precisa y oportuna de variables de interés agrícola de alta variabilidad espacio-temporal, obtenida mediante sensores remotos de tres tipos: imágenes capturadas por satélites o aviones, imágenes obtenidas desde vehículos aéreos tripulados y no tripulados (VANT's) e información puntual con sensores montados en maquinaria o en campo. Estas limitantes se superaron al usar imágenes multiespectrales, lo que ha incrementado las aplicaciones con fines agrícolas. Actualmente, las imágenes multiespectrales permiten cuantificar la humedad del suelo, monitorear la presencia de sequías y el grado de estrés hídrico de cultivos, estimar la variabilidad temporal y espacial de la evapotranspiración, dar seguimiento fenológico, detectar deficiencias nutricionales, estimar grado de infestación de malezas e insectos, calcular carbono orgánico y salinidad del suelo y estimar rendimientos y producción agrícola. El uso de tecnologías geoespaciales en la AP ha cambiado el paradigma de la agricultura y hoy en día constituye una alternativa viable para afrontar los retos que demanda la producción de alimentos en un mundo con alta variabilidad climática.

Palabras clave: productos agrícolas, demanda, variabilidad, espacio-temporal, imágenes, multiespectral.

ABSTRACT: Population growth has led to an exponential demand for agricultural products, to meet this demand it is necessary to improve management and achieve efficient use of resources without compromising the sustainability of ecosystems, particularly agricultural ones. One of the technologies that facilitate these tasks is precision agriculture (PA), which focuses on the optimization of resources and inputs based on the compilation of precise and timely geo-information of variables of agricultural interest with high spatio-temporal variability, obtained through remote sensors of three types: images captured by satellites or airplanes, images obtained from manned and unmanned aerial vehicles (UAVs) and specific information with sensors mounted on machinery or in the field. These limitations were overcome by using multispectral images, which has increased applications for agricultural purposes. Currently, multispectral images allow quantifying soil moisture, monitoring the presence of droughts and the degree of crop water stress, estimating the temporal and spatial variability of evapotranspiration, monitoring phenology, detecting nutritional deficiencies, estimating the degree of weed infestation. and insects, calculate organic carbon and soil salinity, and estimate yields and agricultural production. The use of geospatial technologies in the PA has changed the paradigm of agriculture and today constitutes a viable alternative to face the challenges that food production demands in a world with high climate variability.

Keywords: Agricultural Products, Demand, Variability, Spatiotemporal, Images, Multispectral.

*Author for correspondence: Carlos Fresneda-Quintana: e-mail: cfresneda291@gmail.com

Recibido: 10/01/2023

Aceptado: 09/12/2023

INTRODUCCIÓN

La Agricultura de Precisión (AP). Variabilidad y eficiencia

Los productores agrícolas necesitan explotar de forma eficiente sus parcelas con el objetivo de obtener la mayor rentabilidad posible optimizando los insumos, gracias a la evolución tecnológica, el sector agrario puede beneficiarse de sistemas útiles para aplicarlos en las distintas explotaciones, si bien innumerables técnicas están aún en desarrollo dependiendo de la zona geográfica donde se encuentre la explotación.

Estas técnicas que ayudan a los productores en el manejo de su explotación han de adecuarse a las posibilidades de cada parcela, según las características del cultivo, el terreno disponible, y los costos que puedan abordarse. Para implementar estas nuevas tecnologías, es necesario un cambio de mentalidad por parte del productor, ya que, por lo general, los productores se niegan a abandonar las técnicas tradicionales a las que están acostumbrados para adoptar unas nuevas técnicas más modernas; sin embargo, esta adopción habría de venir justificada por una obtención de mayor rendimiento de la explotación con menores costes de manera muy clara ([Cetin et al., 2005](#)).

El factor clave por el que es necesario un tratamiento distinto del tradicional estriba en la existencia de variabilidad dentro de la parcela de cultivo. Gracias a las nuevas tecnologías, se ha podido comprobar mediante análisis (de suelo, planta, agua de riego...) que la parcela no es uniforme, no se comporta de la misma forma en todos los puntos de su extensión y muchos han sido los autores que han tratado de controlar esa variabilidad ([Tardáguila et al., 2008](#)).

El tratamiento de esa variabilidad es de lo que se ocupa la Agricultura de Precisión (AP), desarrollada a finales de los años 80 en Estados Unidos, Australia y Reino Unido debido al auge de los sistemas de posicionamiento global ([Hidalgo-Togores, 2006](#)). En su tesis doctoral, [Blackmore \(2003\)](#) recuerda los inicios de la AP como el esfuerzo de entender y gestionar la variabilidad de los campos.

El propósito de la AP se centra en una mejor gestión de la variabilidad intraparcularia (variabilidad dentro de una misma parcela), ya que los campos de cultivo no son uniformes en sus características (disponibilidad de agua, radiación solar incidente, topografía, pendiente...) ni en sus necesidades, sino que existe una variabilidad, y por tanto no es eficiente tratar toda la parcela por igual. Según la filosofía de la AP se deben tomar medidas para tratar de forma eficaz cada parte del terreno.

La clave de la AP es aplicar lo que es necesario, donde se necesite y en el momento oportuno, de forma

que exista la mayor eficiencia posible para no malgastar recursos. Esta eficiencia se ve presente en la utilización de antenas GPS en los sistemas de AP, con los que se tienen siempre localizados en el espacio los puntos donde se esté trabajando, además de que implican la obtención de datos en tiempo real, por lo que la disponibilidad de información es mayor.

Otros propósitos de esta filosofía inciden en facilitar la tarea al productor lo máximo posible y ayudarle a mejorar la gestión de la explotación haciéndola más rentable. En resumen, el uso de la AP implica minimizar los insumos, mejorar la eficiencia y crear una agricultura más sostenible.

En general, los sensores utilizados en AP se pueden agrupar en tres clases:

- sensores de control,
- sensores de localización
- sensores de percepción

La visión artificial es una técnica que, con la aparición de la AP, se ha incorporado a la agricultura ([Rees & Doyle, 2010](#)). Esta incorporación supone grandes mejoras, ya que estos sistemas proporcionan información importante relacionada con los cultivos y su entorno; además, permiten indagar en regiones del espectro electromagnético donde el ojo humano no es capaz de operar. Algunas de las ventajas de la visión artificial en el ámbito agrícola son:

- Fiabilidad y objetividad, al no verse afectadas las cámaras por factores como fatiga, hábitos adquiridos, etc., que sí afectan a las personas y, por tanto, a la visión humana
- Aumento de la productividad (rentabilidad) y posibilidad de automatizar operaciones repetitivas
- Eliminación de los métodos invasivos que destruyen los frutos y plantas durante su análisis
- Desarrollo de nuevos sensores para espectros visibles que permiten la detección de anomalías o lesiones en los frutos que no son visibles por el ojo humano.

Precisamente por ser una aplicación nueva, también presenta algunos inconvenientes todavía no resueltos hoy en día con los que tiene que lidiar, ya que los cultivos se encuentran al aire libre y, por tanto, en condiciones cambiantes de iluminación debido a la variación de la posición del Sol a lo largo del día (y del año). Además, existe gran variabilidad de los frutos, con diferencias entre especies, variedades e incluso a nivel individual por tamaño, forma o color; la fragilidad del producto también puede ser un inconveniente en procesos post-cosecha ([Sáiz-Rubio & Rovira-Más, 2012](#)). En este artículo se hace una revisión de una de las tecnologías que facilitan estas tareas es la agricultura de precisión (AP), que se enfoca en la optimización de recursos e insumos

basado en la compilación de geo información precisa y oportuna de variables de interés agrícola de alta variabilidad espacio-temporal, obtenida mediante sensores remotos de tres tipos: imágenes capturadas por satélites o aviones, imágenes obtenidas desde vehículos aéreos tripulados y no tripulados e información puntual con sensores montados en maquinaria o en campo

DESARROLLO DEL TEMA

Composición espectral

Las diversas propiedades de los componentes de una escena se manifiestan a través de la composición espectral de las longitudes de onda que esos componentes emiten y son captados por cámaras fotográficas especiales. Algunos tipos de esas cámaras fotográficas son las denominadas hiperespectrales, multispectral³ y los espectrómetros (Weekley, 2007).

De esta forma, diversos compuestos de una escena pueden caracterizarse mediante lo que se denomina su firma espectral (spectral signature). Actualmente, caracterizar escenas mediante su firma espectral se ha convertido en una alternativa muy socorrida para identificar la presencia de objetos difíciles de identificar mediante otros métodos tradicionales como lo son el análisis de texturas, la segmentación del color, etc. Ejemplo de ello lo es la identificación de la presencia de sustancias peligrosas en un ambiente, la detección de plagas en los cultivos, entre otros.

La vegetación tiene una firma espectral única que le permite distinguirse fácilmente de otros tipos de cobertura terrestre en una imagen óptica / infrarrojo cercano (Towers y von Martini, 2002). Las características espectrales de la vegetación varían con la longitud de onda.

El pigmento de la planta en las hojas, llamado clorofila, absorbe fuertemente la radiación en las longitudes de onda del rojo y el azul, pero refleja la longitud de onda verde (Varvel et al., 1997). Más allá de las longitudes de onda visibles, los espectros de las plantas muestran un fuerte aumento de la reflectancia. La región de alta reflectancia de la planta en el extremo de longitud de onda del infrarrojo cercano se denomina meseta del infrarrojo cercano (Quebrajo-Moya et al., 2016).

Para el procesamiento de estas imágenes multispectrales se utilizan softwares profesionales como QGIS, Agisoft Photoscan y Pix4Dmapper Ag, este último dedicado expresamente a la agricultura de precisión (Virlet et al., 2015).

Haciendo uso de estos softwares se pueden calcular índices de vegetación, crear mapas y georreferenciar imágenes para utilizarlos luego en la detección de enfermedades, la optimización de la aplicación de fertilizantes, agua y/o productos químicos a los cultivos, así como para la estimación del crecimiento de los cultivos.

El procesamiento sistema de Imágenes multispectrales tiene como objetivo de evaluar necesidades de Nitrógeno en plantaciones de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*).

Programa Nacional de Agricultura de Precisión (PNAgP) Cuba

El 19 de enero del 2018, en el Balance Anual de la Reunión conjunta entre el Grupo de las Industrias Biotecnológica y Farmacéutica (BioCubaFarma) y el Ministerio de Agricultura (Minag), el entonces Primer Vicepresidente de los Consejos de Estado y de Ministros Miguel Díaz-Canel Bermúdez, indica al Centro Nacional para la Producción de Animales de Laboratorio (CENPALAB), “desempolvar” todos los proyectos que se venían ejecutando en la Agricultura de Precisión (AP) en el país. (PNAgP)

El 15 de marzo del presente año se presenta a la Junta Multisectorial del Fondo para la Ciencia e Innovación (FONCI) del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (CITMA), un nuevo proyecto de AP, actualizado con las nuevas Tecnologías de Informática y las Comunicaciones (TICs), tomando como modelo por su novedad a las plantas proteicas. Por su parte el Instituto de Investigaciones de Granos (IIGranos), de conjunto con el Grupo Empresarial GEOCUBA, presentan otro proyecto de AP en el cultivo del arroz. Ambos proyectos fueron aprobados posteriormente el 3 de mayo.

El 16 de abril se hace la presentación en el Comité Ejecutivo del Consejo de Ministros (CECM), de los aspectos generales de la tecnología de AP y sus aplicaciones en el Minag, tomándose como acuerdo único actualizar el Programa Nacional de Agricultura de Precisión (PNAgP) hasta el 2025, estableciendo las prioridades para su aplicación, responsabilizando para ello al Ministerio de Agricultura.

El 3 de mayo 2018 se convoca a un Grupo de Trabajo y se realiza una reunión en el Minag, para la actualización del PNAgP. Se designa al Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric) como coordinador del Grupo de Trabajo y se indica elaborar un documento que recoja las experiencias, resultados concretos, así como los impactos de su aplicación. Igualmente debe valorarse las condiciones que hay en el país, las oportunidades existentes, así como las necesidades, prioridades y alianzas necesarias. Se prioriza trabajar en los cultivos de la caña, arroz, papa, frutales y plantas proteicas. Se toman como escenarios las mismas empresas que participaron con anterioridad en este programa y se incluye ahora las áreas de la UEB de Plantas Proteicas, en San Pedro, bajo administración de CENPALAB.

Aunque en nuestro país existen diversos métodos para el cálculo de variables de interés agrícola, como el volumen vegetal, el cálculo del área cultivada y el

cálculo de índices vegetativos, estos no son todavía suficientes para analizar grandes extensiones de cultivos y se hacen extremadamente costosos e inexactos por la cantidad de personal que involucran y el tipo de mediciones que se emplean. Es por ello que el estudio se llevará a cabo y se pretende optimizar estos métodos mediante un sistema de imágenes satelitales de resolución espectral que genere los resultados con mayor exactitud.

O como los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS), sensores planta-clima-suelo e imágenes multispectrales obtenidas a partir de satélites, aviones o UAVs (García y Herrera, 2015).

La agricultura de precisión basa su propósito en tener en cuenta la variabilidad espacial y temporal dentro del terreno de cultivo para decidir sobre el momento, la localización, la cantidad necesaria y el tipo de insumo que hay que administrar, minimizando costos, impacto al medio ambiente y maximizando la producción. A través de esta práctica se brinda solución a determinados problemas que puedan afectar el desarrollo de los cultivos como el manejo eficiente del agua, el tratamiento localizado de herbicidas y el uso óptimo de fertilizantes, el conteo de plantas, la detección temprana de plagas y enfermedades en cultivos, entre otros (Bongiovanni et al., 2006).

Los países de EE. UU., Canadá y Australia marcan la avanzada en el uso de esta técnica. Según una encuesta realizada en los EE. UU. en el año 2011, la adopción de imágenes satelitales y fotografías aéreas en la AP aumentó de un 16,1 % a un 30,3 % entre el año 2008 y el 2011. El creciente uso de la AP por parte de los productores en dicho país se informó en una encuesta realizada por el Centro de Agro negocios y Alimentos en el año 2011.

El conocimiento de los productores sobre la variación en sus campos también es un factor importante que influye tanto en la percepción como en la adopción de las tecnologías de la AP. Se observó que aquellas personas que tienen más conocimiento sobre la variación espacial en las propiedades del suelo de las tierras arrendadas tenían más posibilidades de reconocer y adoptar la tecnología de AP (Basso, 2014). La agricultura de precisión es relativamente nueva y las tecnologías en desarrollo hacen posible reducir sus errores y costos para lograr una agricultura ecológica y económicamente sostenible.

Procesamiento de imágenes y cálculo de Índices Vegetativos

La información que brindan las imágenes multispectrales sobre las plantas y los suelos, permite obtener de manera satisfactoria varios parámetros relacionados con la agricultura de precisión. Diversos autores exponen aplicaciones concretas del procesamiento de imágenes multispectrales.

Según Gago et al. (2015), se detecta el estado hídrico de las plantas, utilizando imágenes térmicas de elevada resolución espacial, obtenidas mediante un UAV. El estrés hídrico en los cultivos provoca el cierre de las estomas, reduciendo la transpiración y aumentando la temperatura de las hojas, pudiéndose monitorizar esto, a partir de sensores térmicos. El volumen de información obtenido permite un mejor aprovechamiento del agua.

Según Candiago et al. (2015), a partir de la determinación del contenido de clorofila de las plantas se obtiene la concentración de nitrógeno de la hoja, ya que guardan estrecha relación. De esta manera se determina el estrés nutricional en los cultivos, para así realizar un uso óptimo de fertilizantes, utilizando estos solo en las zonas en las que son necesarios.

Según Tian (2002), se determina el estrés en la vegetación, producido por la presencia de plagas y enfermedades, generándose mapas diversos, que permiten detectar procesos en los cultivos en forma focalizada, así como dimensionar el problema y evaluarlo en forma puntual. Esto permitirá aumentar los beneficios económicos de los agricultores y evitará la aplicación innecesaria de compuestos fitosanitarios.

En gran medida estas aplicaciones se derivan de los índices vegetativos, que no son más que combinaciones algebraicas de varias bandas espectrales, diseñadas para resaltar el vigor y las propiedades de la vegetación como biomasa, radiación absorbida y el contenido de clorofila (Gutiérrez-Rodríguez et al., 2005).

Entre todos los IV que existen, los más usados y derivables de un sensor multispectral tribanda son: NDVI, GNDVI y SAVI (Candiago et al., 2015). Otros IV son el CWSI y el PRInorm, utilizados para medir el estrés por sequía en los cultivos, un parámetro fundamental en los cultivos debido a las sequías cíclicas que están ocurriendo en los últimos años.

El índice de vegetación más conocido y usado es el Índice Normalizado Diferencial de Vegetación (NDVI Normalized Difference Vegetation Index). Este índice se basa en el peculiar comportamiento radiométrico de la vegetación, relacionado con la actividad fotosintética y la estructura foliar de las plantas, permitiendo determinar la vigorosidad de la planta.

Entre todos los IV que existen, los más usados y derivables de un sensor multispectral tribanda son: NDVI, GNDVI y SAVI (Candiago et al., 2015). Otros IV son el CWSI y el PRInorm, utilizados para medir el estrés por sequía en los cultivos, un parámetro fundamental en los cultivos debido a las sequías cíclicas que están ocurriendo en los últimos años.

Los valores del NDVI están en función de la energía absorbida o reflejada por las plantas en diversas partes del espectro electromagnético. La respuesta espectral que tiene la vegetación sana, muestra un claro contraste entre el espectro visible, especialmente la banda roja, y el Infrarrojo Cercano

(NIR). Mientras que en el visible los pigmentos de la hoja absorben la mayor parte de la energía que reciben, en el NIR, las paredes de las células de las hojas, que se encuentran llenas de agua, reflejan la mayor cantidad de energía.

En contraste, cuando la vegetación sufre algún tipo de estrés, ya sea por presencia de plagas o por sequía, la cantidad de agua disminuye en las paredes celulares por lo que la reflectividad disminuye el NIR y aumenta paralelamente en el rojo al tener menor absorción clorofílica. Esta diferencia en la respuesta espectral permite identificar con relativa facilidad la vegetación sana.

Los primeros resultados sugieren que el sensor es capaz de detectar las variaciones de clorofila en la hoja o el estado del Nitrógeno inducido mediante la variación de sus niveles de aplicación, ya que las variaciones en las lecturas del sensor (GNDVI) estuvieron altamente correlacionadas con los tratamientos de Nitrógeno realizados y las lecturas del medidor de clorofila en tierra para ambos híbridos.

Desde hace más de 30 años se acumulan las evidencias sobre el potencial y utilidad que presenta la medida de la temperatura del cultivo para monitorizar el estado hídrico del mismo. Por ello, la medición de la temperatura de la cubierta ha sido propuesta como una alternativa a la medida del potencial hídrico. Cuando se induce el estrés hídrico, las estomas de la hoja se cierran, la tasa de transpiración se reduce y su efecto refrigerativo disminuye, lo cual hace que la temperatura de la hoja se eleve. Se ha demostrado que la detección de la temperatura de una cubierta vegetal usando sensores o imágenes infrarrojas puede ser aplicada para el cálculo de CWSI y estimar así el estado hídrico del cultivo para establecer una adecuada programación del riego en multitud de cultivos (Quebrajo-Moya *et al.*, 2016).

Un procedimiento para estimar el agotamiento de la humedad del suelo y la fracción de agotamiento en la raíz utilizando CWSI por teledetección fue implementado por los autores (Colaizzi *et al.*, 2003). El procedimiento fue probado en algodón con un regadío de superficie de baja frecuencia en Maricopa, en el estado de Arizona y funcionó razonablemente bien. También fue relacionado el CWSI con mediciones in situ de la humedad del suelo a través del coeficiente de estrés hídrico K_s y la correlación entre el CWSI y la lectura de la humedad del suelo. El uso del CWSI, para estimar FDEP (agotamiento de la humedad del suelo) o sea el momento de realizar el regadío y el DR (agotamiento de la humedad en la raíz) o sea la cantidad de agua a regar mejoró en gran medida la gestión del riego y brindó una mayor Desde hace más de 30 años se acumulan las evidencias sobre el potencial y utilidad que presenta la medida de la temperatura del cultivo para monitorizar el estado hídrico del mismo. Por ello, la medición de la

temperatura de la cubierta ha sido propuesta como una alternativa a la medida del potencial hídrico.

Cuando se induce el estrés hídrico, las estomas de la hoja se cierran, la tasa de transpiración se reduce y su efecto refrigerativo disminuye, lo cual hace que la temperatura de la hoja se eleve. Se ha demostrado que la detección de la temperatura de una cubierta vegetal usando sensores o imágenes infrarrojas puede ser aplicada para el cálculo de CWSI y estimar así el estado hídrico del cultivo para establecer una adecuada programación del riego en multitud de cultivos (Quebrajo-Moya *et al.*, 2016).

Un procedimiento para estimar el agotamiento de la humedad del suelo y la fracción de agotamiento en la raíz utilizando CWSI por teledetección fue implementado por los autores (Colaizzi *et al.*, 2003). El procedimiento fue probado en algodón con un regadío de superficie de baja frecuencia en Maricopa, en el estado de Arizona y funcionó razonablemente bien. También fue relacionado el CWSI con mediciones in situ de la humedad del suelo a través del coeficiente de estrés hídrico K_s y la correlación entre el CWSI y la lectura de la humedad del suelo. El uso del CWSI, para estimar FDEP (agotamiento de la humedad del suelo) o sea el momento de realizar el regadío y el DR (agotamiento de la humedad en la raíz) o sea la cantidad de agua a regar mejoró en gran medida la gestión del riego y brindó una mayor eficiencia del uso del agua, siendo esta una meta importante mientras la competencia por los recursos hídricos, la tierra, y la presión para disminuir los impactos ambientales tienden a aumentar en las próximas décadas

Teledetección

El término teledetección es una traducción del inglés remote sensing, y se refiere no solo a la captación de datos desde el aire o el espacio, sino también a su posterior tratamiento. Si se hiciera una definición más formal, la teledetección se describiría como la técnica que permite adquirir y estudiar los datos de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales, en virtud de la interacción electromagnética existente entre la tierra y el sensor, y proviniendo la fuente de radiación ya sea del sol (teledetección pasiva) o del propio sensor (teledetección activa) (Chuvienco, 2007).

Los sentidos solo perciben un objeto cuando logran descifrar la información que éste les envía y cuando su propia visión es, en sí, un proceso de teledetección, en el que participan principalmente tres elementos según Chuvienco (2007):

1. Sensor: el ojo.
2. La película fotográfica: el objeto observado
3. Flujo energético, que permite poner a los dos anteriores en relación.

Este flujo procede del objeto ya sea por reflexión de la luz solar (color de los objetos), por emisión propia o, también, podría tratarse de energía emitida por el propio sensor y reflejada por el objeto, en cuyo caso, la teledetección recibe el nombre de ACTIVA, por oposición a la teledetección PASIVA, en la que la fuente energética es el sol.

La posibilidad de adquirir información a distancia se basa en la especificidad de la interacción entre la radiación electromagnética y la materia, pues todos los objetos tienen una respuesta espectral propia, a pesar de que presenten una combinación espectral similar a la de otros objetos o superficies que cuentan con las mismas características u homogeneidad.

Sensores remotos

Un sensor remoto es un instrumento capaz de detectar, caracterizar y cuantificar la energía proveniente de los objetos situados a distancia, con lo que se logra obtener información relevante de ciertas características que poseen dichos objetos

La teledetección permite adquirir información que es imposible identificar con el ojo humano, ya que posee células fotosensibles para el llamado espectro visible, una pequeña porción del espectro electromagnético que oscila entre 450 hasta los 700 nanómetros (nm), todas las demás longitudes de onda no pueden ser percibidas por el ojo humano. Dado lo anterior los sensores remotos están diseñados para capturar datos que superan los límites del ojo humano tanto por defecto como por exceso.

Esto permite extraer información de las imágenes que es imposible apreciar de otra manera, generando aplicaciones para muchos campos de investigación. Los datos capturados por el sistema de percepción remota, se almacenan en matrices donde cada valor de la matriz representa una pequeña porción de la energía reflejada.

Estos datos almacenados en la matriz posteriormente se representan con una escala de color que se asigna de acuerdo al valor almacenado en la celda. Una vez asignada una representación gráfica a la matriz, se obtiene una imagen que está compuesta por píxeles (valores de cada celda), sin embargo la resolución de la imagen es considerada de acuerdo a su resolución espacial (cantidad de píxeles por imagen), resolución espectral (rango del espectro electromagnético que puede capturar), resolución radiométrica (todos los posibles valores que puede tomar una celda) y resolución temporal (intervalo de tiempo en el que puede volver a ser tomada la imagen para la misma zona).

Corine land cover (CLC)

Para la identificación de la cobertura de la tierra existen varios sistemas de clasificación, sin embargo, el utilizado en Colombia es el sistema de clasificación

Corine Land Cover (CLC). Este sistema proviene de un programa de homogenización de conceptos para la identificación de cobertura terrestre de la agencia europea del medio ambiente para escala 1:100.000, esta clasificación tuvo que ser adecuada a la realidad del terreno colombiano, ya que difiere de la geografía europea. Como resultado de este ajuste el IDEAM posee una clasificación basada en CLC para el territorio colombiano dividida en cinco capítulos:

1. Territorios artificializados.
2. Territorios agrícolas.
3. Bosques y áreas seminaturales.
4. Áreas húmedas.
5. Superficie de agua.

Cobertura predominantemente compuesta por cultivo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L), planta gramínea tropical de la familia Poaceae de donde se extrae el azúcar, con forma de pasto gigante emparentada con el sorgo y el maíz. Es un cultivo predominantemente industrial. Se corta cada 12 meses, y la plantación dura aproximadamente 5 años, tiene un tallo macizo de 2 a 5 metros de altura con 5 o 6 cm de diámetro. Se cultiva generalmente en terrenos planos y la zona de producción óptima se ubica entre los 800 y los 1.200 msnm.

Definición de SIG

Existen muchas definiciones de SIG (Sistemas de Información Geográfica) que no es simplemente un programa. En general los SIG son sistemas que permiten el uso de información geográfica (los datos tienen coordenadas espaciales). En particular, los SIG permiten ver, consultar, calcular y realizar análisis espaciales de los datos, que principalmente son de tipo Ráster y Vectorial. Los datos vectoriales están formados por objetos que pueden ser puntos, líneas y polígonos; cada objeto puede tener uno o más atributos con valores. Un ráster es una cuadrícula (o imagen) en la que cada celda tiene un atributo con valores (Fisher y Unwin, 2005). Muchas aplicaciones SIG utilizan imágenes ráster que son obtenidas con sensores remotos.

Clasificación supervisada

Una clasificación semi-automática (también llamada una clasificación supervisada) es una técnica de procesamiento de imágenes que permite la identificación de materiales en una imagen a partir de sus firmas espectrales. Existen varios tipos de algoritmos de clasificación, pero el propósito general es producir un mapa temático de la cobertura del suelo (Figura 1). El procesamiento de imágenes y el análisis espacial con SIG requieren de software específico, tal como el Semi-Automatic Classification Plugin de QGIS.

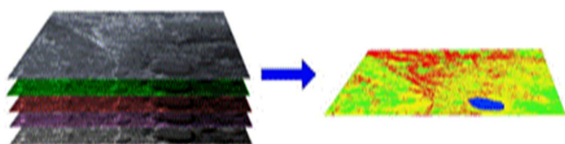


FIGURA 1. Imagen multispectral procesada para producir una clasificación de la cobertura del suelo (Imagen Landsat proporcionada por USGS).

Usualmente, la clasificación supervisada requiere que el usuario seleccione una o más Regiones de Interés (ríos, o Áreas de Entrenamiento) para cada clase de cobertura del suelo identificada en la imagen. Los ríos son polígonos dibujados sobre áreas homogéneas de la imagen que se superponen a píxeles pertenecientes a la misma clase de cobertura del suelo.

Clorofila

Las clorofilas son una familia de pigmentos de color verde que se encuentran en las cianobacterias y en todos aquellos organismos que contienen plastos en sus células, lo que incluye las plantas y los diversos grupos de protistas llamados algas. Estas moléculas son las responsables de captar la energía luminosa en los primeros eventos de la fotosíntesis.

Nitrógeno

El nitrógeno es un elemento químico, de número atómico 7, símbolo N y que, en condiciones normales, forma un gas diatómico (nitrógeno diatómico o molecular) que constituye el 78% del aire atmosférico. En ocasiones, es llamado ázoe-antiguamente, se usó el símbolo Az para representar el nitrógeno.

Suelo

Se denomina suelo a la parte no consolidada de la corteza terrestre, biológicamente activa, que tiende a desarrollarse en la superficie de las rocas emergidas por influencia de la intemperie y los seres vivos (meteorización).

Los suelos son sistemas complejos donde ocurre una vasta gama de procesos químicos, físicos y biológicos, los cuales se ven reflejados en la variedad de suelos existentes en la tierra. A grandes rasgos, puede decirse que los componentes del suelo se dividen en sólidos, líquidos y gaseosos, y generalmente corresponden a minerales y material orgánico como el agua y el aire. De manera más esquemática, vale decir que la pedosfera, el conjunto de todos los suelos, abarca partes de la litosfera, la biosfera, la atmósfera y la hidrosfera.

Fertilizantes

Son un tipo de sustancia o mezcla química, natural o sintética, usada para enriquecer el suelo y favorecer

el crecimiento vegetal. Las plantas no necesitan compuestos complejos del tipo de las vitaminas o aminoácidos, pues ellas sintetizan todo lo que precisan. No obstante, exigen una docena de elementos químicos que deben presentarse de forma tal para que la planta los pueda absorber. Dentro de esta limitación, el nitrógeno, por ejemplo, puede administrarse con igual eficacia en forma de urea, nitrato, compuestos de amonio o amoniaco puro.

Espectrómetro

El espectrómetro es un instrumento de medición que analiza el tipo de espectro que emite

una fuente o que es absorbido por una sustancia que se encuentra en el camino de la luz producido por una fuente. Estos espectros de emisión o de absorción son como una huella digital de las sustancias que componen la naturaleza.

El funcionamiento del espectrómetro está basado en la descomposición de la luz de las diferentes longitudes de onda que la componen, a partir de los fenómenos de refracción -que sucede en un prisma- o difracción -que se produce en una red de difracción-. Este instrumento mide los ángulos en los cuales se presentan los máximos del patrón de difracción. Dichos ángulos son diferentes y caracterizan la naturaleza de la fuente que emite la luz. Las componentes básicas de un espectrómetro son un conjunto de lentes, un colimador, una rejilla de difracción y un ocular. Anteriormente, para detectar el espectro se hacía a simple vista, pero, hoy en día, puede fotografiarse e, incluso, se pueden usar sensores de luz que marcan los máximos y mínimos.

Espectrofotometría

Todas las sustancias pueden absorber energía radiante; aún el vidrio que parece ser completamente transparente absorbe radiación de longitudes de onda que no pertenecen al espectro visible. La absorción de las radiaciones ultravioletas, visibles e infrarrojas depende, pues, de la estructura de las moléculas y es característica de cada sustancia química.

Cuando la luz atraviesa una sustancia, parte de la energía es absorbida (la energía radiante no puede producir ningún efecto sin ser absorbida). El color que adquieren las sustancias mismas se debe a que absorben ciertas longitudes de onda de la luz blanca que incide sobre ellas y solo dejan pasar a nuestros ojos aquellas longitudes no absorbidas.

La espectrofotometría ultravioleta-visible usa haces de radiación del espectro electromagnético que van de 80 a 400 nm en el rango UV (principalmente, de 200 a 400 nm, lo que se conoce como rango UV cercano) y de 400 a 800 nm en el rango de luz visible, por lo que es de gran utilidad para caracterizar los materiales en la región ultravioleta y visible del espectro. No está de más mencionar el hecho de que la absorción y

transmitancia de luz depende tanto de la cantidad de la concentración como de la distancia recorrida.

Índices de vegetación

El cálculo de índices de vegetación es una técnica muy utilizada dentro del campo de la teledetección. [Rahman et al. \(2004\)](#) menciona el mejoramiento de la discriminación entre dos cubiertas que presentan un comportamiento refractivo muy distinto en dos o más bandas, por ejemplo, con el fin de realzar los suelos y la vegetación en el visible e infrarrojo cercano, y para reducir el efecto del relieve (pendiente y orientación) en la caracterización espectral de distintas cubiertas.

Índices espectrales

Los índices de vegetación (VI por sus siglas en inglés) combinan información espectral contenida en dos o más bandas, usualmente en el VIS y NIR, o ambos. Estos índices tienen como objetivo la extracción de información óptima sobre los objetos investigados. Al respecto, [Rahman et al. \(2004\)](#) y [Lopes & Reynolds, 2012](#)) afirman que algunos de estos índices son muy útiles en la medición de parámetros de los cultivos tales como el área foliar, el porcentaje de biomasa verde, la productividad y la actividad fotosintética. Dentro de dichos índices, se destaca el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) que está asociado a la variabilidad de la clorofila de las hojas, su contenido de nitrógeno y la producción de caña de azúcar.

Por citar algunos ejemplos, se encuentra el índice de vegetación verde (VI Green) derivado de la reflectancia espectral de las bandas verde y roja, y utilizado por [Torres-Sánchez et al. \(2013\)](#) tanto para determinar el contenido de proteína en hojas de trigo que están en el estado de antesis como para predecir el contenido de proteína en el momento de cosecha. [Best et al. \(2011\)](#), por su parte, evaluaron los índices de vegetación NDVI y SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) obtenidos a través de percepción remota como estimadores del crecimiento de algodón y remolacha azucarera, estando relacionados con la cobertura del suelo, la biomasa y el índice de área foliar.

Por último, [Best et al. \(2011\)](#), encontró que al realizar vuelos con un sensor hiperespectral y utilizar

el índice de vegetación PRI (Photo chemical Reflectance Index), podían detectarse cambios diurnos en los indicadores del estrés hídrico tales como la diferencia entre la temperatura del aire y la temperatura del dosel, la conductancia estomática y el potencial hídrico en el tallo.

Índices espectrales para la estimación de clorofila

En la revisión bibliográfica realizada, se encontró que el espectro de la planta presentaba una meseta entre los 750-800 nm, determinada por la estructura y la composición de la hoja, y no por el contenido de clorofila pues la influencia de esta sustancia indujo un mínimo en los alrededores correspondiente a 670 nm. De acuerdo con lo anterior, se puede decir que, a mayor presencia de clorofila, mayor profundidad del espectro con respecto a la meseta superior.

Dentro de una hoja, además de la clorofila, se encuentran pigmentos que tienen una importante absorción espectral en la región del azul, como son los carotenoides. Por tanto, el mejor intervalo para estudiar la clorofila a través de técnicas de percepción remota es el comprendido entre los 600 y 700 nm según [Lopes & Reynolds \(2012\)](#).

Según [Torres-Sánchez et al. \(2013\)](#), el espectro de reflectancia de plantas adultas y sanas se caracteriza por una fuerte absorción (baja reflectancia) en el azul (400-500 nm), un incremento en la reflectancia en el verde (500-600 nm), una alta absorción en el rojo (600-700 nm) y una fuerte reflectancia y transmitancia en el infrarrojo (NIR) (700 a 1500 nm). Por su parte, la respuesta en reflectancia en la región VIS (400-700) está gobernada en las plantas por el efecto y comportamiento de las clorofilas, carotenos y antocianinas.

La reflectancia normal es baja en la región de 480 y 680 nm debido a la absorción de clorofila y otros pigmentos, y es alta en el NIR debido a la estructura micro celular de la hoja y la estructura del dosel. Por lo anterior, en este proyecto, se implementó el uso de índices de vegetación que utilizaran el intervalo del espectro electromagnético comprendido entre 550 y 750 nm, ya que este rango sería de gran utilidad para la estimación de clorofila ([Tabla 1](#)).

TABLA 1. Índices espectrales implementados

| Índice | Fórmula |
|--|--|
| Modified Chlorophyll Absorption In Reflectance Index | $MCARI = [(R700 - R670) - 0,2(R700 - R550)] / (R700 / R670)$ |
| Vogelman Indices | $Vog1 = (R740) / (R720)$ $Vog2 = (R734 - R747) / (R715 + R726)$ $Vog3 = (R734 - R747) / (R715 + R720)$ |
| Gitelson & Merzlyak (1997) | $GM1 = R750 / R550$ $GM2 = R750 / R700$ |
| Zarco-Tejada et al. (2001) | $ZTM = (R750) / (R710)$ |
| Red-Edge Model (R-M) | $R - M = R750 / R720 - 1$ |
| Normalized Difference Vegetation Index | $NDVI = (R800 - R670) / (R800 + R670)$ |

Interacción de la radiación y la planta

La reflectancia y la transmisión son definidas como las tasas de radiación reflejada o transmitida de la radiación incidente. La radiación incidente que no es reflejada o transmitida por la hoja es absorbida. La interacción entre la radiación solar y las moléculas de las plantas controla la reflectancia visible e infrarroja. Los componentes bioquímicos y estructurales influyen en la tendencia de las plantas a absorber, transmitir y reflejar distintas longitudes de onda de la radiación solar que esté entre los 300 y 3000 nm.

La absorción de radiación de onda corta por parte de las plantas es controlada por interacciones moleculares que ocurren dentro del tejido vegetal, en donde los electrones absorben la radiación solar entrante en longitudes de onda controladas por uniones químicas y estructurales (Gates et al., 1965). Por tanto, los cambios en las concentraciones de los químicos absorbentes proporcionan una base para los cambios en la absorción, transmisión y reflectancia vegetal. Los dos componentes de absorción visible e infrarroja que hay en las hojas de las plantas, principalmente, son la clorofila y el agua.

La absorción por clorofila es afectada por las transiciones de electrones entre 430 y 460 nm, y 640 y 660 nm según Basso (2014), mientras que las bandas de absorción del agua están alrededor de 970 nm, 1200 nm, 1450 nm, y 1780 nm. Otros compuestos bioquímicos absorbentes que resultan importantes son las

proteínas, los lípidos, el almidón, la celulosa, el nitrógeno y los aceites. No obstante, vale la pena anotar que, a través de la reflectancia infrarroja, la estimación de las concentraciones de estos compuestos es difícil de establecer debido a los traslapes de las bandas de absorción de varios de los componentes bioquímicos.

Ahora bien, basado en el principio de que “todo objeto en la naturaleza posee una distribución única de radiación electromagnética que puede ser reflejada, transmitida o absorbida” según García-Cervigón (2015), se crea la curva de firma espectral, en tanto cada especie vegetal presenta una reflectancia exclusiva influenciada ya sea por sus características morfológicas, fisiológicas, nutrimentales o por efecto de un déficit de humedad. En otras palabras, la firma espectral es distinta según las longitudes de onda. A propósito, Lopes & Reynolds (2012) añaden que la señal que recibe el sensor corresponde al color, es decir, la energía electromagnética reflejada.

Se ha evidenciado el auge alcanzado a nivel mundial por los sistemas de procesamiento de imágenes multispectrales en la agricultura de precisión, demostrando la importancia del uso de las imágenes satelitales espectrales generados por estos sistemas y sus aplicaciones en los cultivos de la caña de azúcar.

CONCLUSIONES

1. La aplicación de la Agricultura de Precisión es la vía más segura para aumentar las producciones, ahorrando insumos agrícolas y cuidando el medio ambiente.
2. El procesamiento de las imágenes satelitales resolución multispectrales para evaluar necesidades de Nitrógeno en plantaciones de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), debe ser las vías para buscar rendimientos cañeros.
3. Los centros de investigación que existen en el país, realizan diferentes acciones que responden a diversos programas y proyectos, pero, la respuesta aún no llega a solucionar los problemas que se presentan en el sector productivo en función de sus requerimientos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BASSO, B.: *Perspectivas y avances del uso de UAV en AP en USA*, Curso Internacional de Agricultura de Precisión ed., vol. 13, Manfredi, Córdoba, Argentina, 9, 24-25, p., 2014.
- BEST, S.; LEÓN, L.; FLORES, F.; AGUILERA, H.; QUINTANA, R.; CONCHA, V.: *Handbook “Agricultura de Precisión”, [en línea]*, Ed. Progap - INIA (Programa de Agricultura de Precisión), Progap-INIA. ed., 2011, Disponible en: <http://www.elsitioagricola.com/CultivosExtensivos/Libro/IniaAP/lilib3.asp>
- BLACKMORE, S.: *The role of yield maps in precision farming*, Cranfield University, Silsoe, England, Tesis doctoral, Silsoe, England, Publisher: Cranfield University Silsoe, UK p., 2003.
- BONGIOVANNI, R.; CHARTUNI, E.; BEST, S.; ROEL, Á.: *Agricultura de precisión: Integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable. Programa Cooperativo para el Desarrollo Tecnológico Agroalimentario y Agroindustrial del Cono Sur*, Inst. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, Prociur/IICA, 2006.
- CANDIAGO, S.; REMONDINO, F.; DE GIGLIO, M.; DUBBINI, M.; GATTELLI, M.: “Evaluating multispectral images and vegetation indices for precision farming applications from UAV images”, *Remote sensing*, 7(4): 4026-4047, 2015, ISSN: 2072-4292, Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- CETIN, H.; PAFFORD, J.; MUELLER, T.: “Precision agriculture using hyperspectral remote sensing and GIS”, En: *Proceedings of 2nd International Conference on Recent Advances in Space Technologies, 2005. RAST 2005.*, Ed. IEEE, pp. 70-77, 2005, ISBN: 0-7803-8977-8.

- CHUVIECO, E.: "Mirar desde el espacio o mirar hacia otro lado: tendencias en teledetección y su situación en la geografía española", *Documents d'anàlisi geogràfica*, (50): 75-85, 2007, ISSN: 2014-4512.
- COLAIZZI, P.D.; BARNES, E.M.; CLARKE, T.R.; CHOI, C.Y.; WALLER, P.M.: "Estimating soil moisture under low frequency surface irrigation using crop water stress index", *Journal of irrigation and drainage engineering*, 129(1): 27-35, 2003, ISSN: 0733-9437, Publisher: American Society of Civil Engineers.
- FISHER, P.; UNWIN, D.: *Re-presenting geographical information systems*, Ed. Re-presenting GIS. London: Wiley, London, England, 1-17 p., 2005.
- GAGO, J.; DOUTHE, C.; COOPMAN, R.E.; GALLEGO, P.P.; RIBAS-CARBO, M.; FLEXAS, J.; ESCALONA, J.; MEDRANO, H.: "UAVs challenge to assess water stress for sustainable agriculture", *Agricultural Water Management*, 153: 9-19, 2015, ISSN: 0378-3774, Publisher: Elsevier.
- GARCÍA, C.; HERRERA, F.: "Percepción remota en cultivos de caña de azúcar usando una cámara multispectral en vehículos aéreos no tripulados", En: *Anais Simposio Brasileiro de sensoramento remoto-SBSR (17, 2015, João Pessoa-PB, Brasil). Memoria. Brasil*, João Pessoa-PB, Brasil, pp. 4450-4457, 2015.
- GARCÍA-CERVIGÓN, J.J.D.: *Estudio de índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de éstos a la agricultura de precisión.*, Inst. Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España, 2015.
- GATES, D.M.; KEEGAN, H.J.; SCHLETER, J.C.; WEIDNER, V.R.: "Spectral properties of plants", *Applied optics*, 4(1): 11-20, Publisher: Optica Publishing Group, 1965, ISSN: 2155-3165.
- GITELSON, A.A.; MERZLYAK, M.N.: "Remote estimation of chlorophyll content in higher plant leaves", *International journal of remote sensing*, 18(12): 2691-2697, 1997, ISSN: 0143-1161.
- GUTIERREZ-RODRIGUEZ, M.; ESCALANTE-ESTRADA, J.A.; RODRIGUEZ-GONZALEZ, M.T.: "Canopy reflectance, stomatal conductance, and yield of *Phaseolus vulgaris* L. and *Phaseolus coccineus* L. under saline field conditions", *International Journal of Agriculture and Biology*, 7: 491-494, 2005.
- HIDALGO-TOGORES, J.: *La calidad del vino desde el viñedo*, Ed. Mundi-Prensa Libros, Madrid, España, 2006, ISBN: 84-8476-462-1.
- LOPES, M.S.; REYNOLDS, M.P.: "Stay-green in spring wheat can be determined by spectral reflectance measurements (normalized difference vegetation index) independently from phenology", *Journal of Experimental Botany*, 63(10): 3789-3798, 2012, ISSN: 1460-2431, Publisher: Oxford University Press.
- QUEBRAJO-MOYA, L.; EGEEA-CEGARRA, G.; PÉREZ-RUIZ, M.; PÉREZ-URRESTARAZU, L.: "Uso de imágenes térmicas aéreas en remolacha azucarera (*Beta vulgaris*) para propuesta de riego de precisión", En: *XXXIV Congreso Nacional de Riegos, Sevilla 2016*, Ed. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola, Sevilla, España, 2016.
- RAHMAN, M.; ISLAM, A.; RAHMAN M, A.: "NDVI derived sugarcane area identification and crop condition assessment [J]", *Plan Plus*, 1(2): 1-12, 2004.
- REES, S.; DOYLE, R.: "Effect of soil properties on Pinot Noir vine vigour and root distribution in Tasmanian vineyards", En: *19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World*, pp. 1-6, 2010.
- SÁIZ-RUBIO, V.; ROVIRA-MÁS, F.: "Dynamic segmentation to estimate vine vigor from ground images", *Spanish Journal of Agricultural Research*, 10(3): 596-604, 2012, ISSN: 1695-971X, Publisher: Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA).
- TARDÁGUILA, J.; BARRAGÁN, F.; YANGUAS, R.; DIAGO, M.: "Estimación de la variabilidad del vigor del viñedo a través de un sensor óptico lateral terrestre. Aplicación en la viticultura de precisión", En: *VI Foro Mundial del Vino. Logroño, 23-25 abril 2008, World Wine Forum*, Logroño, Spain, 2008.
- TIAN, L.: "Development of a sensor-based precision herbicide application system", *Computers and electronics in agriculture*, 36(2-3): 133-149, 2002, ISSN: 0168-1699, Publisher: Elsevier.
- TORRES-SÁNCHEZ, J.; PEÑA-BARRAGÁN, J.; GÓMEZ-CANDÓN, D.; DE CASTRO, A.; LÓPEZ-GRANADOS, F.: "Imagery from unmanned aerial vehicles for early site specific weed management", En: *Precision agriculture'13*, Ed. Springer, pp. 193-199, 2013.
- TOWERS, P.; VON MARTINI, A.: *Conceptos iniciales sobre teledetección y su aplicación al Agro, [en línea]*, Buenos Aires. Argentina, 2002, Disponible en: <http://www.elsitioagricola.com/Soft/agrisat/libroTeledeteccion.asp>.
- VARVEL, G.E.; SCHEPERS, J.S.; FRANCIS, D.D.: "Ability for in-season correction of nitrogen deficiency in corn using chlorophyll meters", *Soil Science Society of America Journal*, 61(4): 1233-1239, 1997, ISSN: 0361-5995, Publisher: Wiley Online Library.
- VIRLET, N.; COSTES, E.; MARTINEZ, S.; KELNER, J.J.; REGNARD, J.L.: "Multispectral

airborne imagery in the field reveals genetic determinisms of morphological and transpiration traits of an apple tree hybrid population in response to water deficit”, *Journal of Experimental Botany*, 66(18): 5453-5465, 2015, ISSN: 1460-2431, Publisher: Oxford University Press UK.

WEEKLEY, J.G.: *Multispectral imaging techniques for monitoring vegetative growth and health*, Virginia Polytechnic Institute and State University,

Thesis of Máster, Virginia, USA, Publisher: Virginia Tech p., publisher: Virginia Tech, 2007.

ZARCO-TEJADA, P.J.; MILLER, R.J.; NOLAND, T.L.; MOHAMMED, H.G.; SAMPSON, H.P.: “Scaling-up and model inversion methods with narrowband optical indices for chlorophyll content estimation in closed forest canopies with hyperspectral data”, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(7): 1491-1507, 2001, ISSN: 0196-2892.

Carlos Fresneda-Quintana. Profesor Auxiliar. MSc., Universidad de Cienfuegos “Carlos Rafael-Rodríguez”. Cuba. Tel: +53 43595541-Móvil: 56 28 46 28, e-mail: cfresneda291@gmail.com

Arturo Martínez-Rodríguez. Dr.Cs., Profesor e Investigador Titular. Universidad Agraria de La Habana “Fructuoso Rodríguez Pérez” (UNAH), Tel: +53 59874467, Cuba. e-mail: armaro646@gmail.com

Alexander Laffita-Leyva. MSc., Profesor Asistente, Universidad Agraria de La Habana “Fructuoso Rodríguez Pérez” (UNAH). Cuba, Tel: +53 58762916, e-mail: alex1@unah.edu.cu

Odalys Zamora-Díaz. Dra., Profesora Instructora, Universidad de Ciencias Médicas “Raúl Dorticós-Torrado” Cienfuegos, Cuba. Tel: +53 43595541, e-mail: cfresneda291@gmail.com

Los autores de este trabajo declaran no tener conflicto de intereses.

CONTRIBUCIONES DE AUTOR: **Conceptualización:** C. Fresneda, A. Martínez. **Curación de datos:** C. Fresneda, A. Martínez. **Análisis formal:** C. Fresneda, A. Martínez, A. Laffita. **Investigación:** C. Fresneda, A. Martínez, A. Laffita, O. Zamora. **Supervisión:** C. Fresneda, A. Martínez. **Validación:** A. Montesino, D. González. C. Fresneda, A. Martínez, A. Laffita, O. Zamora. **Redacción–borrador original:** C. Fresneda, A. Martínez. **Redacción–revisión y edición:** C. Fresneda, A. Martínez, A. Laffita.

La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a fines de identificación, no existe ningún compromiso promocional relacionado con los mismos, ni para los autores ni para el editor.

Este artículo se encuentra bajo licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)