

Agroindustria

Artículo de investigación

Aplicación de una metodología de análisis de datos obtenidos por percepción remota orientados a la estimación de la productividad de caña para panela al cuantificar el NDVI (índice de vegetación de diferencia normalizada)

Application of a method of analysis of remote sensing data obtained by targeting the estimated productivity in cane for quantifying panela NDVI (normalized difference vegetation index)

Fabio Rueda Calier,¹ Luis Alfonso Peñaranda Mallungo,² Wilmer Leonardo Velásquez Vargas,³ Sergio Antonio Díaz Báez⁴

¹ PhD, Universidade Federal de Pernambuco. Profesor, Universidad Cooperativa de Colombia (UCC). Bucaramanga, Colombia. fabio.ruedac@campussucc.edu.co

² Especialista, Universidad Industrial de Santander. Gerente de Compra de Tabaco, British American Tobacco Colombia. San Gil, Colombia. luis_penaranda@bat.com

³ Ingeniero agrícola, Fundación Universitaria de San Gil (Unisangil). Instructor Agrícola Población víctima de la violencia, Servicio Nacional de Aprendizaje SENA. Piedecuesta, Colombia. wille_aries@hotmail.com

⁴ Ingeniero agrícola, Fundación Universitaria de San Gil (Unisangil). Asistente en Formulación de Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (Pomcas), Engineering for the Management and Environmental Soil. SAS. EMES. Bogotá, Colombia. sergiodiazbaez@gmail.com

Fecha de recepción: 21/08/2014

Fecha de aceptación: 09/02/2015

Para citar este artículo: Rueda F, Peñaranda LA, Velásquez WL, Díaz SA. Aplicación de una metodología de análisis de datos obtenidos por percepción remota orientados a la estimación de la productividad de caña para panela al cuantificar el NDVI (índice de vegetación de diferencia normalizada). *Corpoica Cienc Tecnol Agropecu.* 16(1): 25-40

Abstract

The productivity estimation sugar cane is very important for Colombian economy. The Net Primary Production (NPP) model is applied on present investigation from Kumar & Monteith to regional scale. Analyzing spatiotemporal with geomantic techniques and edaphoclimatic environment characterization. Field surveys were conducted too, to acquire physiological information of plants evaluated and soil conditions of the plantation under study. The data acquired was input in ArcGIS10.1 software, to make processing these. A series thematic map was resulted from data processing from spatiotemporal distribution of plantation soil characteristics and biophysical characteristics. The variables $fPAR$, PAR , EUR was calculate from Kumar & Monteith efficiency model. Remote sensing and mathematic models related and fraction absorbed photosynthetically active radiation derivates from Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and incident photosynthetically active radiation in land sensors recorded was calculated. Chemical and physical properties in laboratory tests were realized to soil, for relation knowledge between edaphoclimatic conditions and biophysical variables related with the sugar cane biomass gainer for Panela production. The information integrated from Geographic Information System (GIS) and edaphic data and climatic data in country recorded, shows the behavior of the plantation as it develops.

Key words: Remote sensing, GIS, NDVI, edaphoclimatic, biophysical

Resumen

La estimación de la productividad en caña de azúcar resulta de gran importancia para la economía colombiana. En el presente trabajo, se aplica el modelo de Productividad Primaria Neta (PPN) a escala regional de Kumar y Monteith. Se hacen análisis espacio-temporales con técnicas de geomática y caracterización edafoclimáticas del entorno. También, se realizaron monitoreos de campo, para adquirir la información fisiológica de las plantas evaluadas y las condiciones edáficas de la plantación objeto de estudio. Los datos colectados fueron analizados en el software ArcGIS 10.1. Como resultado, se obtuvo una serie de mapas temáticos de la distribución espacio-temporal de las características del suelo y biofísicas de la plantación. Se calcularon las variables $fPAR$, PAR , EUR de la ecuación del modelo, mediante percepción remota y modelos matemáticos relacionados a través del índice de vegetación de diferencia normalizada (por su sigla en inglés, NDVI) y radiación fotosintética incidente registrada por el sensor en tierra. Esta información se validó mediante pruebas de laboratorio de las propiedades físicas y químicas de suelos, para comparar las condiciones edafoclimáticas y las variables biofísicas relacionadas con la ganancia de biomasa. Los resultados muestran que de la información geográfica (SIG) y los datos edáficos y climáticos registrados en campo permiten anticipar las respuestas fisiológicas de la plantación, objetivo de estudio en el presente trabajo.

Palabras claves: Percepción remota, SIG, NDVI, producción

Introducción

La caña de azúcar (*Saccharum Officinarum* L.) es una gramínea perenne, probablemente originaria del sudeste asiático, presente en la franja climática tropical. En su tallo, tiene la capacidad de almacenar sacarosa, que es la materia prima para la producción de azúcar, melaza y panela. Este último producto tiene un papel pertinente a nivel nacional en los sistemas económicos y agrícolas.

En Colombia, dentro de los cultivos permanentes, de acuerdo a la Encuesta Nacional Agropecuaria (Departamento... 2014), la caña panelera ocupa el tercer lugar en superficie plantada, con 171.203 hectáreas (ha), y es superada por el plátano, con 197.144 ha, y el café, con 728.531 ha.

En el año 2013, los departamentos con mayor superficie de caña de azúcar plantada fueron: Antioquia, 33.314 ha; Santander, 23.304 ha; Boyacá, 21.037 ha y Cundinamarca con 17.510 ha (Departamento... 2013).

La producción panelera se configura en el ámbito nacional como una de las principales actividades agrícolas de la economía colombiana, de acuerdo a:

- Su aporte significativo al Producto Interno Bruto (PIB), con el 7,3% del total aportado por el sector agrícola.
- El área total cultivada, pues la caña panelera es el cultivo con mayor representatividad en el país (Osorio et al. 2015).
- Los datos suministrados por el Invima, que indican que el sector panelero genera 91.956 empleos directos (Instituto... 2009).
- La generación de empleo rural pues es la actividad económica rural que más puestos de trabajo genera, aproximadamente 350.000, que representan el 12% de la población rural económicamente activa (Osorio et al. 2015).

En la actualidad, se evidencian la importancia y el impacto que genera la producción de caña panelera en el país, pues aporta una fuente de alimentación a los hogares colombianos, lo que la convierte en un ítem relevante en la canasta familiar. Cabe resaltar que la panela está ganando proyección internacional como producto orgánico, natural libre de agroquímicos, que pretende competir con el azúcar y los jarabes endulzantes. A la fecha, se cuentan con experiencias de exportación de panela a países como: España, Estados Unidos y Argentina.

No obstante, la agroindustria panelera es todavía muy tradicional y presenta un gran número de dificultades relacionadas con la baja productividad, que oscila entre 61,32 t/ha a 61,70 t/ha (Ministerio... 2013). Esto afecta de forma directa los demás eslabones de la cadena productiva, tales como: los procesos de transformación, la calidad del producto, el mercadeo y la organización de los productores, que se ven reflejados en la reducción del ingreso de los productores y empleados del sector.

Este diagnóstico evidencia la necesidad de desarrollar tecnologías que permitan hacer más eficiente y eficaz la producción de caña, la inminente necesidad de adaptar nuevas variedades e implementar manejos agronómicos adecuados, con el propósito de obtener materias primas de alta calidad, con mayor cantidad biomasa, optimización de los procesos, reducción de los tiempos de molienda y elaboración de productos con alta demanda. Todas estas deficiencias justifican el desarrollo e implementación de modelos que permitan estimar el potencial productivo de las variedades de caña existentes y, así mismo, validar y evaluar nuevos genotipos en proceso de adaptación.

La evaluación del potencial productivo de la caña de azúcar destinada a la producción de panela es llevada a cabo a través de observaciones de campo y muestreos utilizando datos estadísticos de encuestas agropecuarias, con datos imprecisos y sin rigor científico o tecnológico, tomados por los propios agricultores. Estos carecen de información de la distribución espacial del área plantada y las variaciones en la plantación originadas en los factores edafoclimáticos y edáficos.

El primer paso en la estimación, optimización de la producción y el uso de los recursos de biomasa cañera, es la elaboración de un diagnóstico de la factibilidad del uso potencial de las tierras agrícolas para producción de caña de azúcar. Sin embargo, las mediciones sobre el terreno no son viables de realizar con el rigor deseado, debido a las condiciones de distribución espacial. Por tales deficiencias, se han realizado tradicionalmente los estimativos de la producción a través de análisis estadístico (Elmorea et al. 2008; Krishna et al. 2002; Fortes 2003). No obstante, en la región panelera de la hoya del río Suárez, existe carencia absoluta de información histórica de estadísticas de la producción, lo que dificulta el ejercicio de hacer proyecciones de la producción y su rentabilidad.

Ante esta situación, las técnicas de percepción remota (PR), en especial los sistemas Landsat (pasivos), el

monitoreo con vehículos aéreos no tripulados (UAV por su sigla en inglés). dotados con sensores de alta resolución; también, sistemas de información geográfica (SIG) y de geoposicionamiento satelital (GPS) son herramientas útiles en la georreferenciación de zonas agrícolas, lo que permite hacer una estimación de la producción, la detección de enfermedades e identificar brotes de estrés, a través de análisis de la información colectada, y de la distribución espacial del cultivo, al mapear las diferentes zonas productivas, realizar muestreo en las zonas y hacer observación en campo. De esta manera, se propician mejores estimaciones del potencial productivo de las áreas sembradas, y se aplica la agricultura de precisión (AP) o sitio específico, que se basa en la variabilidad espacial del suelo y parámetros de campo de los cultivos (Ueno et al. 2005; Soria-Ruiz 2004; Rudorff y Batista 1990; Epiphanyo et al. 1996).

Esto se debe, según Bégué et al (2008) y Ji-hua y Bing-fang (2008), a que la variabilidad en el crecimiento y, por ende, la productividad del cultivo de caña de azúcar está relacionada con múltiples factores complejos, que pueden depender o no del clima. Los primeros están relacionados directamente con el sustrato: topografía, profundidad y tipo y uso anterior del suelo. Factores anuales como anomalías en la plantación y emergencia o condiciones climáticas, y estacionales como enfermedades de la planta, malezas, sequía, inundaciones o heladas pueden, a su vez, interactuar con lo que se genera un patrón espacio-temporal complejo, que explica diagnósticos acerca de la vigorosidad del cultivo y la productividad de la planta de caña de azúcar, bajo un escenario ambiental particular.

Tal condición ha favorecido la aparición de diferentes modelos de estimación de productividad a nivel mundial, que integran el uso de sensores remotos junto a las plataformas SIG, y así se complementan los modelos con información edofoclimática de la zona. Para este caso en particular, se ha implementado el modelo de Productividad Primaria Neta (PPN) a escala regional de Kumar y Monteith (1981), que permite la inclusión de información satelital, junto con el modelo con información edofoclimática de la zona en estudio.

El presente artículo contiene, de forma sucinta, el desarrollo de la metodología aplicada al proceso de investigación y las pautas aplicadas que permitirán cumplir con el objetivo de la investigación. La cual es desarrollar una metodología de análisis de datos obtenidos

mediante percepción remota orientados a la estimación de la productividad de la caña de azúcar al cuantificar el NDVI.

Materiales y métodos

La zona de estudio correspondió a una parcela de aproximadamente 10.000 m² donde se hallaban plantadas variedades en adaptación, se evaluaron diez promisorias variedades de caña de azúcar, orientadas a la producción de panela en la hoya del río Suárez. El experimento se encontraba ubicado en la vereda La Teja (municipio de Güepsa, Santander). La parcela se halla en las coordenadas geográficas: 73° 33' 37" longitud Oeste y 6° 02' 39", latitud Norte.

La parcela experimental de adaptación fue dividida en diez lotes demostrativos, cada uno con un área aproximada de 1.000 m². El conjunto de variedades a evaluar fueron: CC93-714, CC93-7510, CC93-7711, CCSP89-43, CC92-2965, CC92-2198, CC99-1405, CC91-1555, CC93-3458 y como testigo de la variedad comercial de la zona RD 7511, que se cultiva con mayor frecuencia en la zona y con mayor antigüedad, lo que la convertía en una variedad adaptada a las condiciones edafoclimáticas de la zona de la hoya del río Suárez. Cabe aclarar que todo lo concerniente al proceso de propagación y adaptación de las variedades fue llevado a cabo por el Centro de Investigación del Mejoramiento de la Panela Cimpa-Corpoica. Las tareas allí se concentraron en la captación de información de suelos y variables biofísicas a través de sensores remotos. Estas mediciones se realizaron durante el periodo de madurez vegetativa de las variedades en propagación y, por ende, se obtuvo información sobre acumulación de biomasa al final del ciclo vegetativo previa a la cosecha y la molienda.

La biomasa se calculó usando el modelo de productividad primaria neta (PPN) (ecuación 1), ajustada a escala regional de Kumar y Monteith (1981).

$$PPN = fPAR \times PAR \times \epsilon \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde se tiene que PPN es la producción primaria neta, con unidades (g/m²); $fPAR$ es la fracción de energía radiante que efectivamente intercepta el canope; radiación fotosintéticamente activa incidente (PAR), medida en el sensor en tierra, con unidades (MJ/m²); y ϵ es el factor de eficiencia con que la vegetación usa radiación en el proceso de fotosíntesis, con unidades (g/MJ).

NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada)

El índice de vegetación es una combinación de valores de reflectancia en diferentes longitudes de onda, con alta sensibilidad a cambios en la vegetación y baja sensibilidad a otra información (de tipo atmosférica y del suelo). Un gran número de índices de vegetación (IV) están basados en el alto contraste entre la banda del rojo (R) y la del infrarrojo cercano (IRC), para la vegetación viva y verde (Tucker 1979). El NDVI se considera un buen método para estimar la biomasa y es universalmente usado; ha resultado un método de medición del índice verde más consistente, para realizar monitoreo de vegetación en los ambientes y las situaciones diversas; incluso, puede ser aplicado en agricultura de precisión y el control de los cultivos, debido a que las variaciones espectrales del follaje son identificables y se pueden usar para monitorear cultivos en crecimiento y como indicadores del estrés al que están sometidos los cultivos, factor indirectamente responsable de su productividad (Xavier et al. 2004; Benefetti y Rossini 1993). La ecuación 2 se empleó para realizar el cálculo.

$$\text{NDVI} = (\text{IRC} - \text{R}) / (\text{IRC} + \text{R}) \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde las variables IRC corresponden a la banda del infrarrojo cercano y R a la banda del rojo. Por definición, los valores de NDVI varían entre +1 y -1 con valores más altos para la vegetación densa y valores muy bajos (o negativos) para nieve, agua y nubes. No obstante, en la práctica, el rango de variación se encuentra entre -0,1 y 0,7 (Rahman et al. 2004). Según Simões et al. (2005), el NDVI es la variable espectral altamente correlacionada con los parámetros agronómicos responsables por el desarrollo y la productividad de las plantas. Por lo tanto, el NDVI contribuye notoriamente a la evaluación del desarrollo de la planta de caña de azúcar y al monitoreo del rendimiento (Abdel-Rahman y Ahmed 2008; Sugar... 2007; Lucas y Shuler 2007 y Picoli 2006).

Para calcular cada variable que hace parte del modelo de estimación de biomasa, se adoptó la metodología que a continuación se describe.

Fración de energía radiante que efectivamente intercepta el canope (*f*PAR)

Este parámetro está directamente relacionado con la estructura y la morfología de la vegetación y las situaciones

de estrés que también lo afectan. Puede ser calculado por diversos métodos, aquí se calcula el *f*PAR usando los valores medidos con NDVI con las ecuaciones 3, 4 y 5. Teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- Una radiometría de campo con equipos como el GreenSeeker. Con este se registró la radiación en cuatro puntos de cada parcela, sumado en total cuarenta mediciones. Cada valor registrado y calculado el NDVI fue georreferenciado mediante GPS.
- Un monitoreo usando un UAV equipado con una cámara multispectral de alta resolución, que permitió la captura de imágenes en las bandas del rojo e infrarrojo cercano y, a través de un software especializado para tratamiento de imágenes, estas se organizaron en un mosaico de la zona en estudio. Se calculó el NDVI medio, tomando los píxeles de las imágenes asociadas a cada uno de los diez lotes, con lo que se obtuvo una media estadística de ellos.

Una vez calculados los valores de NDVI para cada lote, se usaron las ecuaciones 3, con coeficiente de determinación $R^2 = 0,965$ (Asrar et al. 1984); 4, con coeficiente de determinación $R^2 = 0,973$ (Wiegand et al. 1991); y 5 (Potter et al. 1993), para calcular el parámetro *f*PAR.

$$fPAR = \text{NDVI} \times 1,222 - 0,1914 \quad (\text{Ecuación 3})$$

$$fPAR = -0,344 + (0,229)^{0,95 \times \text{NDVI}} \quad (\text{Ecuación 4})$$

$$fPAR = \{[(1 + \text{NDVI}) / (1 - \text{NDVI})] / 4,05\} - 0,2666 \quad (\text{Ecuación 5})$$

Radiación fotosintética activa incidente medida en el sensor de tierra

Esta variable presenta oscilaciones muy sutiles interanuales; por tanto, en condiciones óptimas de crecimiento de la plantación, este parámetro permanece constante. Así mismo, los valores de PAR, pueden ser calculados a partir de los registrados en la radiación global (RG), provistos por estaciones meteorológicas, pues varían en una fracción que permanece relativamente constante y oscila entre los valores desde 42% hasta 55% dependiendo de la ubicación y las condiciones climáticas (Akmal y Janssen 2004).

Para la zona en estudio, los valores de radiación global en el periodo de madurez vegetativa de las especies evaluadas

se extrajeron del servidor del Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) (c2010-2011), usando un software generador de clima (MarkSim™ 2011), según el modelo climático de Roeckner et al. (2003).

Adquiridos los valores de radiación global, se ajustó el valor del parámetro $fPAR$, usando la ecuación 6, embebido en el modelo matemático propuesto por Kumar y Monteith (1981).

$$fPAR = 0,47 \times RG \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde se tiene que RG es la radiación global (MJ/m^2) y ajustado a través de la constante 0,47.

Eficiencia del uso de la radiación (EUR)

Este coeficiente se define como la eficiencia de la planta para convertir luz en biomasa a través de la fotosíntesis, la cual está relacionada con la PAR , pues la cantidad de radiación fotosintéticamente activa incidente, que es absorbida por la planta, es justamente la cantidad EUR (Potter et al. 1993; Field et al. 1995). Inicialmente, Monteith (1972) observó que la relación entre la radiación fotosintéticamente activa absorbida por la vegetación ($APAR$) y la PPN era lineal y muy similares sus pendientes en gran número de especies cultivadas. Debido a estas similitudes sugirió que la EUR debía presentar valores relativamente constantes. Sin embargo, con posterioridad, se reconoció la existencia de una importante distinción entre especies, grupos funcionales y ecosistemas (Ruimy et al. 1994; Gower et al. 1999; Turner et al. 2002).

Monitoreo y evaluación de condiciones edáficas

Para concebir un panorama más amplio del trabajo e ir más lejos que lo que concierne a la percepción remota, se realizó el muestreo de los suelos en la parcela estudiada. Este procedimiento consistió en:

- Recolección de muestras de suelo dentro de la parcela, discriminando cuidadosamente cada lote con el tipo de variedad demostrativa.
- Para seleccionar los puntos donde se tomarían las muestras, se usó un cilindro biselado de volumen conocido aplicando la metodología de muestreo sistemático no lineal. Cada muestra fue etiquetada con el nombre del lote de procedencia y se georreferenció con GPS.

- En el laboratorio, a las muestras se les midió las propiedades físicas y químicas como: humedad volumétrica, densidad aparente y PH . Los resultados fueron tabulados para un análisis posterior.

Integración del sistema de información geográfica

Una vez se culminó la recolección y tabulación de los datos, se llevaron al SIG GreenSeeker donde fue integrada y procesada para ser convertida en información, con datos del $NDVI$, las propiedades físicas y químicas de suelos, posiciones geográficas del GPS y mapas con información geográfica integrada en el *software* ArcGIS10.1. Este GIS permitió analizar e integrar datos geográficos recolectados en la zona y luego modelar su comportamiento espacio-temporal, con lo que se obtuvieron los mapas temáticos de las plantaciones estudiadas.

Discusión de resultados

Los resultados se obtuvieron luego de procesar los datos en el *software* para GIS (ArcGIS10.1 y GreenSeeker) y, posteriormente, someterlos a un minucioso análisis, desde las perspectivas de georreferenciación, de análisis físico y químicos del suelo y el cálculo de parámetros PAR , $fPAR$, $NDVI$ y PPN ; a continuación, se realiza la presentación y la discusión de los resultados.

Georreferenciación con imagen aérea de los lotes de las plantaciones demostrativas

Las imágenes tomadas con cámara fotográfica montada en el UAV y posteriormente organizadas en un mosaico (figura 1), muestran los diez lotes donde se plantaron las nuevas variedades de caña de azúcar destinadas a la producción de panela. El mosaico fue llevado al *software* ArcGIS 10.1 y se le aplicaron los filtros matemáticos, para seleccionar las bandas espectrales del rojo e infrarrojo cercano, y resultó la imagen que se muestra en la figura 1, en ella aparecen los diez lotes demarcados con una línea púrpura.

Es posible distinguir aéreas claras en la imagen, que corresponden al canopeo de caña de azúcar. Las áreas oscuras corresponden a modificaciones fisiológicas de las variedades en estudio y la influencia de los factores edafoclimáticos en la plantación.

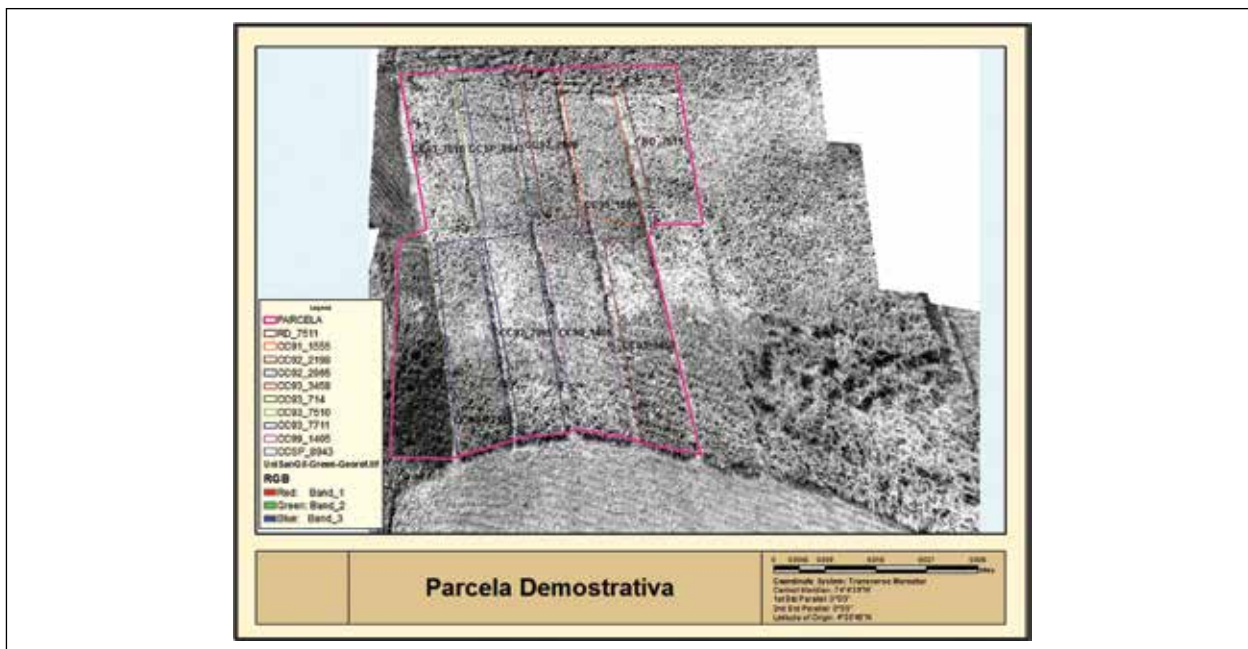


Figura 1. Imagen de los diez lotes estudiados, demarcados en color púrpura. Las áreas claras corresponden al canopeo y las oscuras a las variaciones fisiológicas e influencia de los factores edafoclimáticos en las plantaciones.

Distribución espacial del parámetro NDVI

Los parámetros NDVI calculados por el software GreenSeeker fueron comparados con los valores medidos a partir de las imágenes tomadas con el UAV. En la figura 2 se muestra el gráfico comparativo, donde cada punto corresponde a un lote, los puntos rojos fueron calculados con el GIS GreenSeeker y los

puntos azules a partir de las imágenes registradas por UAV.

De la figura 2 es posible deducir que las metodologías son equivalentes, pues los comportamientos no difieren significativamente, ya que la desviación media cuadrática es de 0,0036, entre las metodologías se mantiene constante la variación y el comportamiento, con valores que oscilan desde 0,0004 hasta 0,01.

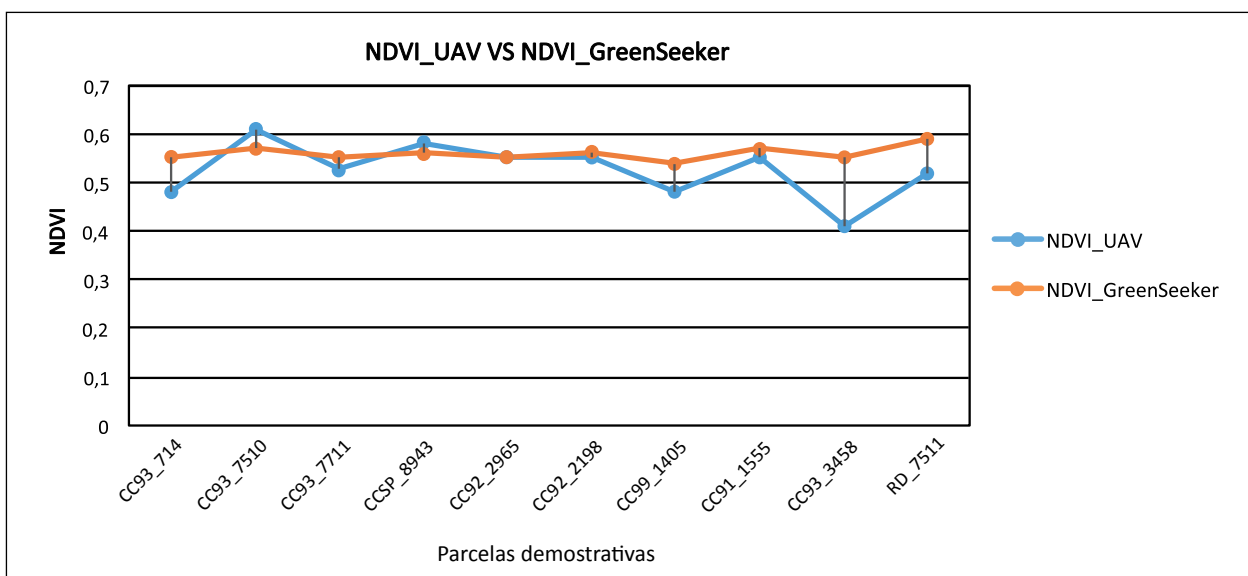


Figura 2. Comparación de los parámetros NDVI calculados al usar el software GreenSeeker y derivados de las imágenes tomadas por el UAV.

La distribución espacial de los valores de NDVI, calculados al usar el *software* GreenSeeker, se puede observar en la figura 3, las áreas en marrón presentan los valores más altos (entre 0,61 y 0,68) de NDVI, donde el canope de las plantas es más relevante; las áreas amarillas corresponden a zonas de la plantación donde existen modificaciones fisiológicas de las variedades en

estudio y las verdes corresponden a una marcada influencia de los factores edafoclimáticos. Las zonas de la plantación marcadas con colores amarillo y verde en la figura 3 tienen valores de NDVI entre 0,42 y 0,41. Cabe resaltar que, en las áreas marcadas, los valores de GreenSeeker están contrastados y perfilados.

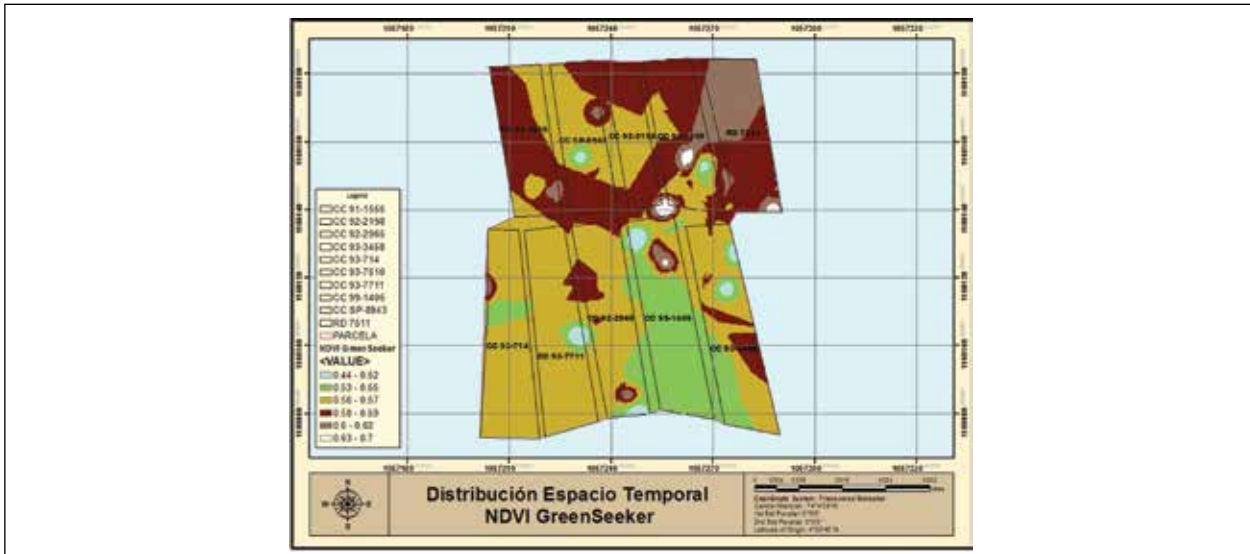


Figura 3. Distribución espacial de los valores calculados de NDVI, al usar el GIS GreenSeeker, se presentan áreas bien definidas, contrastadas y perfiladas.

El gradiente del color verde de la figura 4 hace referencia a los tonos claros de la imagen en la figura 1, donde el canope es máximo. Igualmente, se puede identificar la influencia

de las condiciones edafoclimáticas en el momento de hacer los registros fotográficos de la zona, lo que afectó sensiblemente los valores calculados de NDVI.

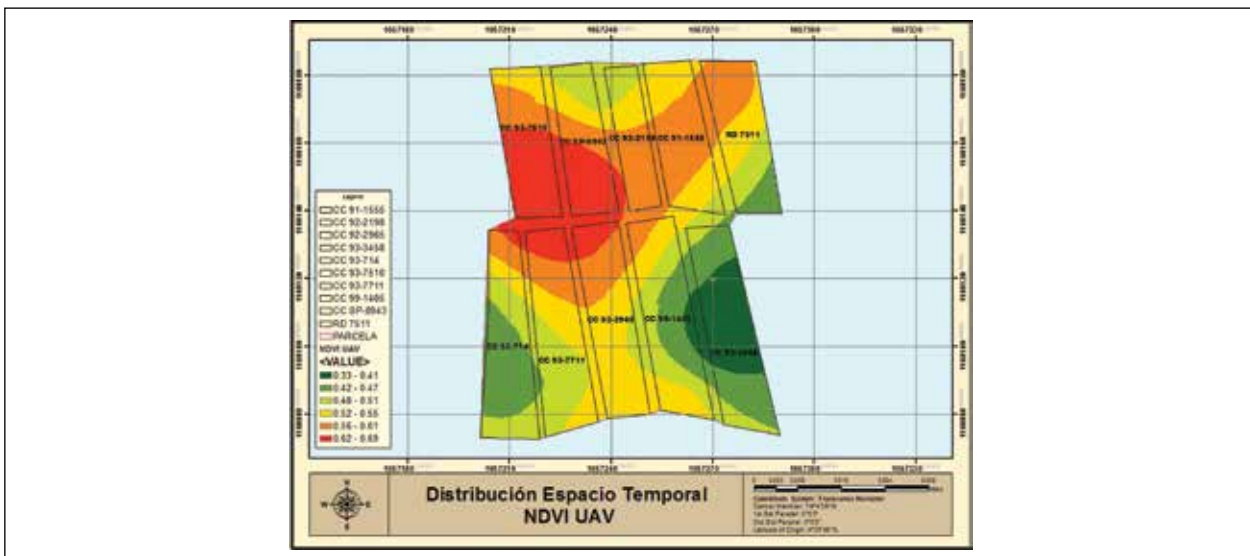


Figura 4. Distribución espacial de los valores NDVI calculados a partir de las imágenes registradas por el UAV, las áreas de interés se presentan como gradientes en una situación más natural.

Propiedades físicas y químicas de las plantaciones

Las pruebas de laboratorio aplicadas en las muestras de suelos extraídos indicaron que las tierras de la parcela en estudio tienen tendencia a la acidez con valores aproximados de pH entre 3,8 y 5,8. El análisis de acidez georreferenciado en forma de distribución

espacial se puede ver en la figura 5. El color verde indica las áreas de mayor acidez, con valores de pH aproximados entre 3,8 y 4,0. En las áreas verde claro la acidez baja a un pH entre 4,0 y 4,3. Las zonas menos ácidas están marcadas con colores que van desde el amarillo hasta el rojo, con valores aproximados entre 4,3 y 5,8.

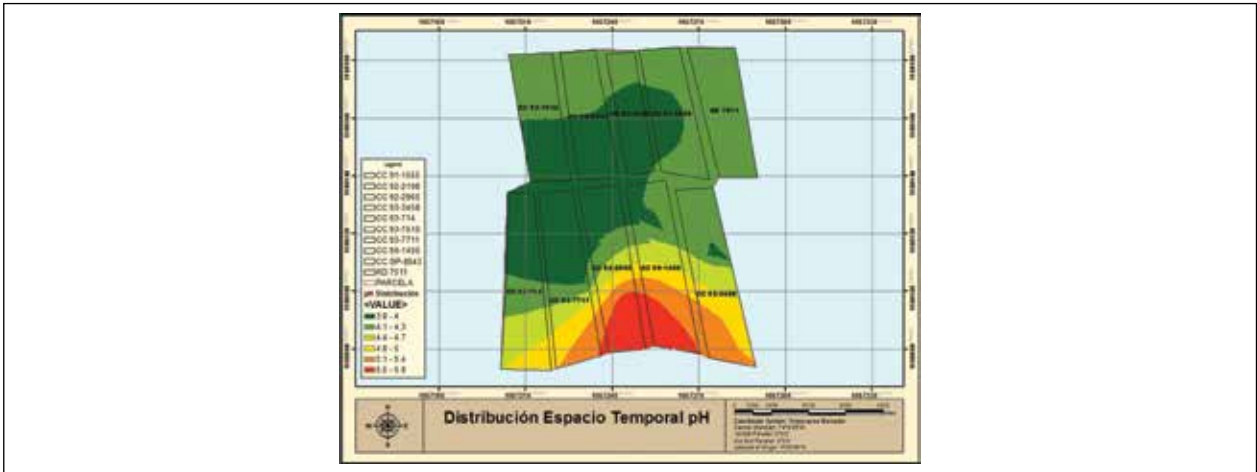


Figura 5. Georreferenciación de la distribución espacial del pH en los 10 lotes. El verde corresponde al mayor grado de acidez y el rojo al menor.

Se considera importante visualizar gráficamente el gradiente de altitud que posee la parcela. En la figura 6 se muestra el gradiente de altitud de los diez lotes, en código de colores: el claro indica la parte más baja de la parcela, con altura aproximada de 1.556 msnm, y, el marrón, el área con mayor altitud, con altura aproximada de 1.576 msnm.

El área de color rojo en la figura 5 (pH aproximado de 5,8), coincide plenamente con el área clara de la figura 6 con altura aproximada de 1.556 msnm. El área verde, en la figura 5, con pH aproximado de 3,8, coincide en aproximadamente el 50% con el área marrón de la figura 6, con mayor altitud, aproximadamente 1.576 msnm. Del anterior análisis se puede afirmar que la acidez de la parcela aumenta con la altura. Una posible explicación para tal relación, podría estar en su origen geofísico.

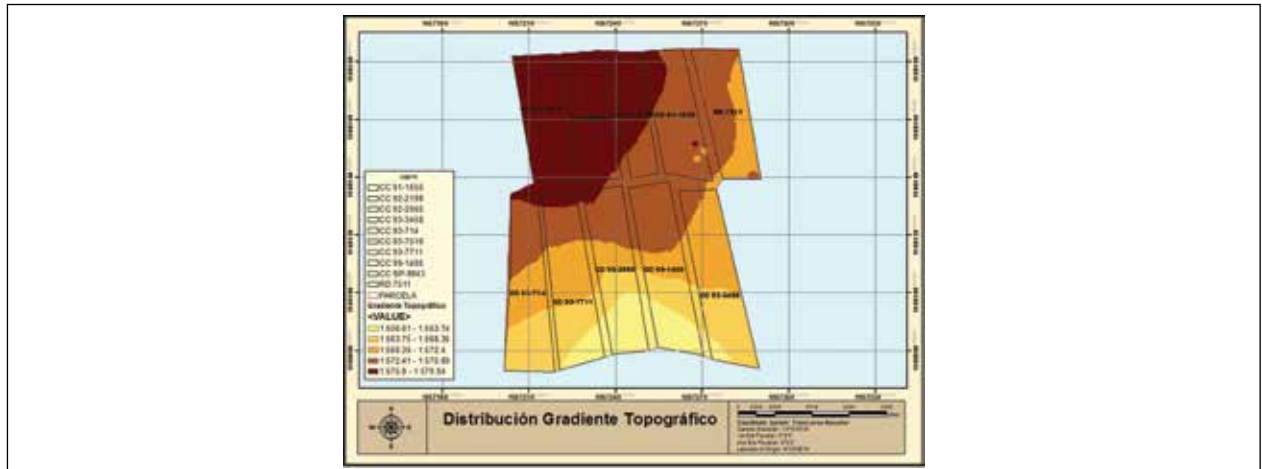


Figura 6. Gradiente de altitud de la parcela dividida en diez lotes. Alturas medidas sobre el nivel del mar. Las más bajas en color claro y la más altas en marrón.

El índice de humedad es considerado un factor determinante en cultivo de la caña de azúcar, por tal motivo se hizo una

representación gráfica de la distribución espacial del índice de humedad en las plantaciones (ver figura 7).

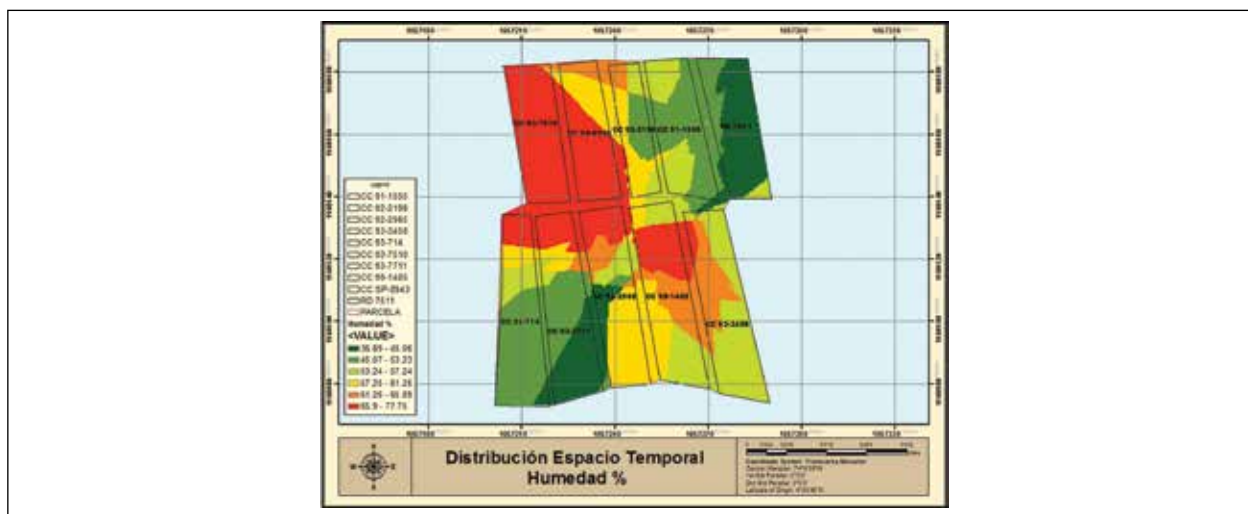


Figura 7. Distribución espacial del índice de humedad en la parcela estudiada. El color verde indica humedad máxima de aproximadamente 77,7% y el rojo indica mínima humedad de aproximadamente 36,8%.

Los suelos de la parcela en estudio muestran una alta capacidad para la retención de humedad. La figura 7 muestra la distribución de humedad en colores, que van desde el verde para las zonas más húmedas, con valores máximos de humedad de aproximadamente 77,7%, hasta el rojo para los menos húmedos, con valores mínimos de humedad de aproximadamente 36,8%. Existe una triple relación entre las áreas de mayor acidez, mayor latitud y máxima humedad (figuras 5, 6 y 7, respectivamente). Al observar los mapas correspondientes

a las figuras 5, 6 y 7, se puede ver que, aproximadamente, el 50% de las áreas en cuestión, sobrepuestas coinciden.

El grado de compactación de los suelos permite evaluar el grado de penetración que la raíz tiene en la tierra. Este hecho motivó la representación gráfica de la densidad del suelo de la parcela, con los parámetros de distribución descrito de la sección “Materiales y métodos”. Los resultados son mostrados en la figura 8, donde los colores claros indican bajas densidades y el marrón indica alta densidad aparente.

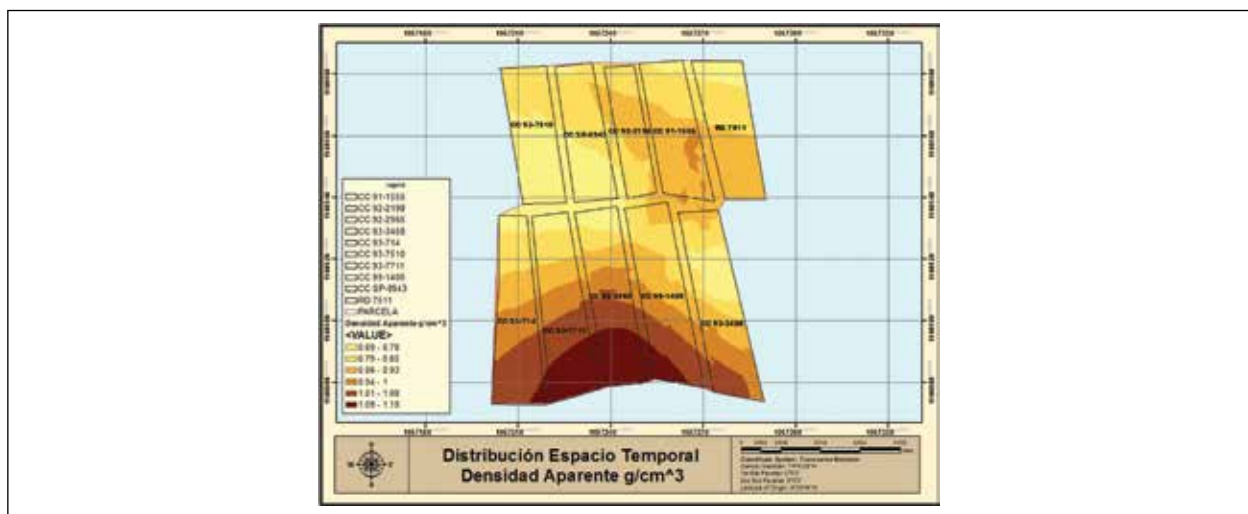


Figura 8. Distribución espacial de la densidad aparente de la parcela en unidades (g/cm³). Los colores claros indican zonas de baja densidad, aproximadamente 0,69 g/cm³, y los marrón de alta densidad, aproximadamente 1,2 g/cm³.

El estudio físico de la densidad en los diez lotes indica las zonas claras con menor compactación, aproximadamente entre $0,6 \text{ g/cm}^3$ y $0,8 \text{ g/cm}^3$, y las zonas de mayor compactación, con aproximadamente entre $0,98 \text{ g/cm}^3$ y $1,2 \text{ g/cm}^3$.

Se puede encontrar una relación inversa con la altitud, pues cuanto más baja mayor es la compactación. En la figura 6, las áreas claras que indican bajas altitudes (1.556 msnm) y las marrón en la figura 8, que indican alta compactación ($1,2 \text{ g/cm}^3$), coinciden plenamente.

Datos $fPAR$

La fracción de energía radiante que efectivamente intercepta el canope resultó muy aproximada a los valores hallados en la literatura.

Los valores $fPAR$ calculados a partir del NDVI, en las ecuaciones 3, 4 y 5 basadas en los modelos de

Asrar et al. (1984), Wiegand et al. (1991) y Potter et al. (1993), respectivamente, resultaron del cálculo hecho al usar las imágenes registradas por el UAV y el *software* GreenSeeker, muestran que el modelo teórico es fuertemente coherente con los resultados experimentales (ver figuras 9 y 10).

La función lineal $f(x) = -0,582x + 0,518$ en la figura 9, fue el resultado de aplicar la regresión y la correlación lineales en los valores calculados del parámetro $fPAR$, que muestran una linealidad cuasi perfecta y coherencia con los valores medidos por Asrar et al. (1984) y Wiegand et al. (1991), pues el coeficiente de determinación (R^2), resulta de elevar al cuadrado el valor de la correlación y fue calculado en 0,99. Mientras que los valores de R^2 publicados por Asrar et al (1984) y Wiegand et al. (1991) fueron 0,965 y 0,973, respectivamente.

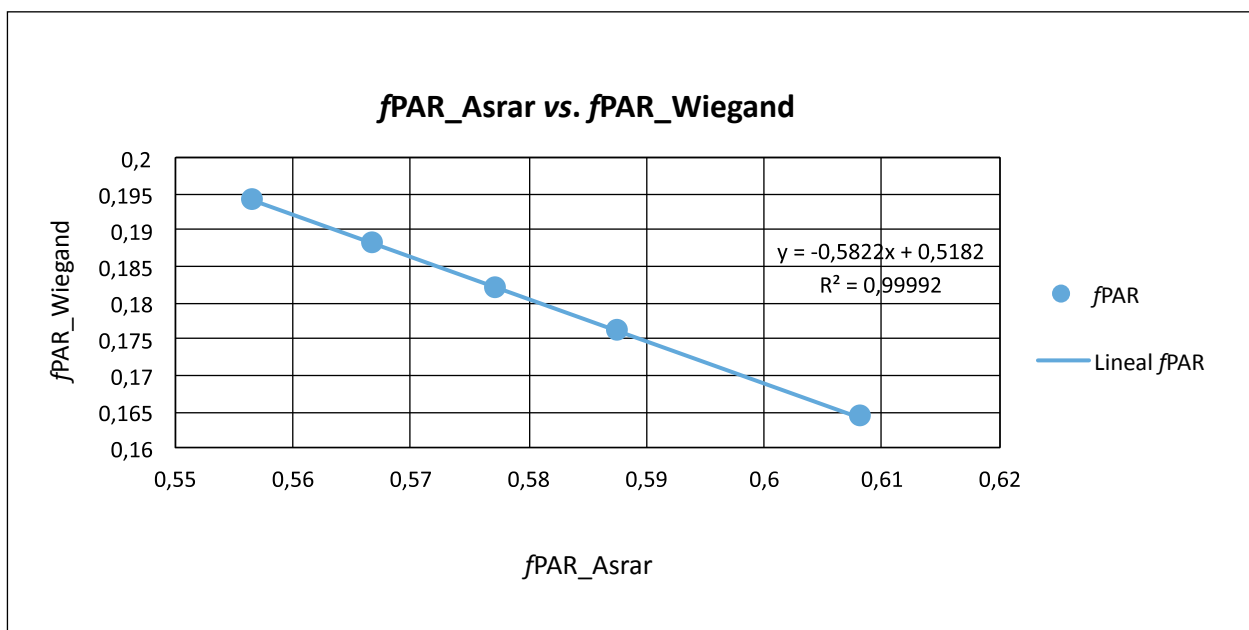


Figura 9. Comparación de los resultados obtenidos de la regresión lineal aplicada a los valores $fPAR$ calculados con las ecuaciones 3 y 4, en la que se muestra estrecha correlación.

Una comparación de los valores del parámetro $fPAR$ obtenidos mediante las ecuaciones 4 y 5, se muestra en la figura 10, en ella se aplicó la regresión y la correlación lineales, y se obtuvo la función lineal $f(x) = -3,289x + 1,212$ y el valor de $R^2 = 0,969$. La correlación de estas, calculadas en este trabajo, guardan estrecha relación con los valores publicados por Asrar et al. (1984) y Wiegand et al.

(1991) de $R^2 = 0,965$ y $R^2 = 0,973$, respectivamente, en sendos trabajos.

En términos generales, es posible afirmar, en función de los datos y resultados aquí mostrados y sustentados, que el parámetro $fPAR$ es altamente confiable, para ser usado en la estimación de la producción primaria neta (PPN).

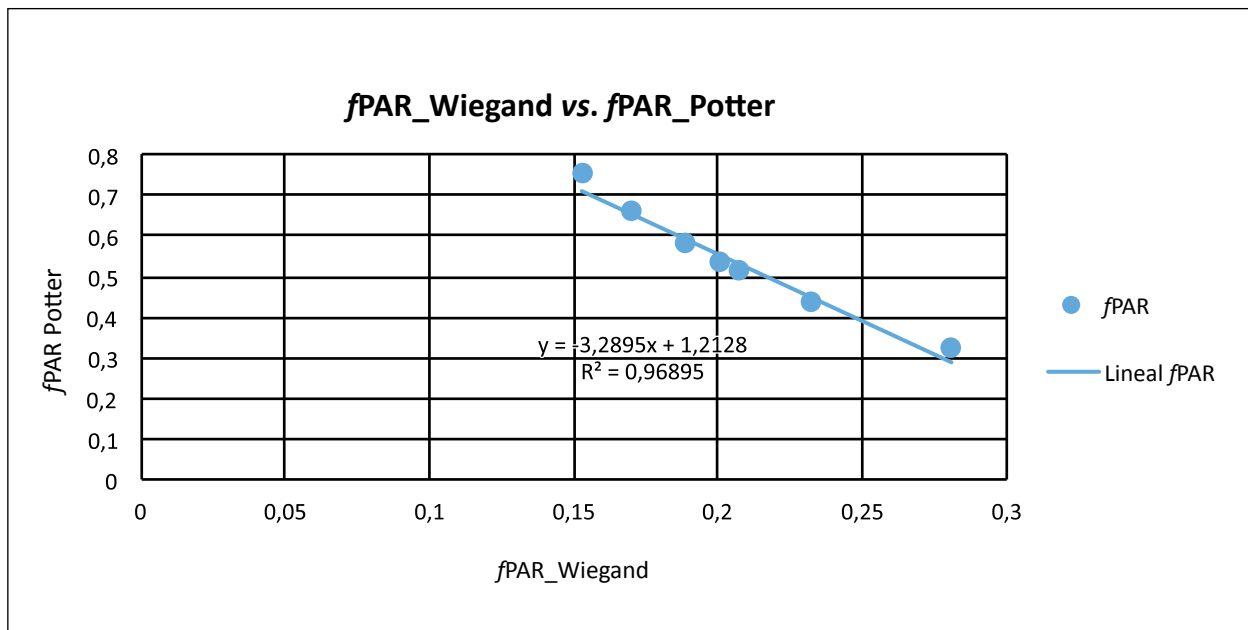


Figura 10. Comparación de los resultados obtenidos de la regresión lineal aplicada a los valores fPAR calculados con las ecuaciones 4 y 5, en la que se muestra estrecha correlación.

Datos PAR

Los valores de radiación fotosintéticamente activa incidente, registradas por el sensor, son presentados en la tabla 1; se muestra la energía radiante medida durante todo el mes, en los años 2012 y 2013 por un periodo de 18 meses, con unidades de megajulios por metro

cuadrado (MJ/m²). También, en la tercera columna de izquierda a derecha se muestra la radiación fotosintéticamente activa con unidades de (MJ/m²). Se puede apreciar en la tabla 1, que durante los 18 meses la radiación registrada, no sufrió alteraciones significativas, así mismo, una regularidad mayor se puede ver en los valores de PAR registrados.

Tabla 1. Valores registrados de la radiación solar, en la ubicación de la parcela en estudio; así mismo, los valores medidos del parámetro PAR muestran regularidad

Mes	RG_MJ/m ²	PAR_MJ/m ²
Enero de 2012	17,90	8,41
Febrero de 2012	17,25	8,11
Marzo de 2012	19,08	8,97
Abril de 2012	15,39	7,23
Mayo de 2012	17,04	8,01
Junio de 2012	18,16	8,54
Julio de 2012	18,03	8,47
Agosto de 2012	21,84	10,26
Septiembre de 2012	19,23	9,04
Octubre de 2012	16,19	7,61
Noviembre de 2012	16,62	7,81
Diciembre de 2012	16,35	7,68

(Continúa)

(Continuación tabla 1)

Mes	RG_MJ/m ²	PAR_MJ/m ²
Enero de 2013	17,90	8,41
Febrero de 2013	17,25	8,11
Marzo de 2013	19,08	8,97
Abril de 2013	15,39	7,23
Mayo de 2013	17,04	8,01
Junio de 2013	18,16	8,54
Julio de 2013	18,03	8,47
Agosto de 2013	21,84	10,26
Suma	357,8	168,15

Cálculos de biomasa PPN

Al calcular los valores de los parámetros que componen la ecuación de estimación de producción primaria neta (ecuación 1), y los resultados del análisis de las propiedades físicas y químicas del suelo, se pudo finalmente calcular la cantidad de biomasa estimada en unidades de gramos por metro cuadrado de tierra (g/m²).

Posteriormente, se pudo extrapolar la ganancia en biomasa para cada uno de los diez lotes en estudio. Tres variedades resultaron con máximo rendimiento, a saber: la variedad CC92-3458 plantada, tendría una producción final de 20.857 kg; la variedad CC93-7711

produciría 19.658 kg; y la variedad CC99-1405 tendría una producción de 19.545 kg. Igualmente, las dos de menor producción fueron: la variedad CC92-2198 con 10.249 kg y la variedad CCSP89-43 con 14.474 kg.

Los resultados completos de los estimativos para la producción de las diez variedades plantadas pueden ser vistos en las tablas 2 y 3.

El estimado de la producción de biomasa se realizó con dos tipos de datos obtenidos con el *software* GreenSeeker, cuyos resultados son mostrados en la tabla 2 y los obtenidos a través de las imágenes registradas por la aeronave no tripulada (UAV), en la tabla 3.

Tabla 2. Valores estimados de ganancia en biomasa al usar el software GreenSeeker, mediante modelos y ecuaciones de Asrar et al. (1984), Wiegand et al (1991) y Potter et al. (1993)

ANPP Datos GreenSeeker (ganancia de biomasa en gramos por área parcela m ²)							
Variedad	Área parcela m ²	ANPP g/m ² _Asrar	ANPP g/m ² _Wiegand	ANPP g/m ² _Potter	ANPP g_Asrar	ANPP g_Wiegand	ANPP g_Potter
CC 93-714	780	23,27	23,97	23,97	18.153,40	18.699	18.699,45
CC 93 75-10	640	24,12	26,07	26,07	15.436,74	16.684	16.684,40
CC 93-7711	820	23,27	23,97	23,97	19.084,34	19.658	19.658,39
CCSP 89-43	579	23,70	25,00	25,00	13.720,41	14.474	14.473,67
CC 92-2965	760	23,27	23,97	23,97	17.687,93	18.220	18.219,97
CC 92-2198	410	23,70	25,00	25,00	9.715,66	10.249	10.249,06
CC 99-1405	850	22,85	22,99	22,99	19.422,87	19.545	19.545,01
CC 91-1555	660	24,12	26,07	26,07	15.919,13	17.206	17.205,79
CC 93-3458	870	23,27	23,97	23,97	20.248,02	20.857	20.857,08
RD 7511	660	24,97	28,37	28,37	16.477,70	18.724	18.723,91

Los valores en las dos tablas discrepan entre sí, no obstante guardan una estrecha relación en su comportamiento y la desviación estándar es aproximadamente 1,0. En

la figura 11 se muestra un gráfico donde aparecen los comportamientos de las estimaciones al usar los dos conjuntos de datos en las tablas 2 y 3.

Tabla 3. Valores estimados de ganancia en biomasa al usar el mosaico registrado por el UAV, mediante modelos y ecuaciones de Asrar et al. (1984), Wiegand et al. (1991) y Potter et al. (1993)

ANPP Datos UAV (ganancia de biomasa en gramos por área parcela m ²)							
Variedad	Área parcela m ²	ANPP g/m ² _Asrar	ANPP g/m ² _Wiegand	ANPP g/m ² _Potter	ANPP g_Asrar	ANPP g_Wiegand	ANPP g_Potter
CC 93-714	780	20,31	9,55	17,91	15.842,96	7.451	13.968,35
CC 93 75-10	640	25,81	6,27	30,91	16.520,01	4.014	19.779,63
CC 93-7711	820	22,43	8,23	22,06	18.390,36	6.751	18.086,15
CCSP 89-43	579	24,54	6,99	27,19	14.210,43	4.045	15.744,22
CC 92-2965	760	23,27	7,73	23,97	17.687,93	5.871	18.219,97
CC 92-2198	410	23,27	7,73	23,97	9.542,17	3.167	9.829,20
CC 99-1405	850	20,31	9,55	17,91	17.264,77	8.119	15.221,92
CC 91-1555	660	23,27	7,73	23,97	15.360,57	5.099	15.822,61
CC 93-3458	870	17,35	11,53	13,28	15.093,98	10.032	11.555,25
RD 7511	660	22,00	8,49	21,16	14.522,72	5.604	13.963,96

Donde la producción está dada en gramos, los puntos en rojo corresponden a los valores estimados al usar los datos de GreenSeeker y los puntos en azul los datos a partir de las imágenes registradas por el UAV.

Para validar las metodologías analizadas, presentadas y usadas en la estimación de la producción de biomasa, se colectaron los valores de la producción obtenida una vez cosechados y molidos los diez lotes. Los datos se obtuvieron

y graficaron en la figura 11 y son presentados en color verde. Es posible observar que existe un amplio desfase entre los datos calculados y los efectivamente medidos, luego de cosechada la caña (reales). Esta aparente inconsistencia entre los modelos usados para estimar la PPN y la efectivamente cosechada, puede ser explicada en el manejo de la producción y en la cosecha de la misma, pues el manejo que se da al cultivo de la caña de azúcar en la zona es netamente manual y tradicional.

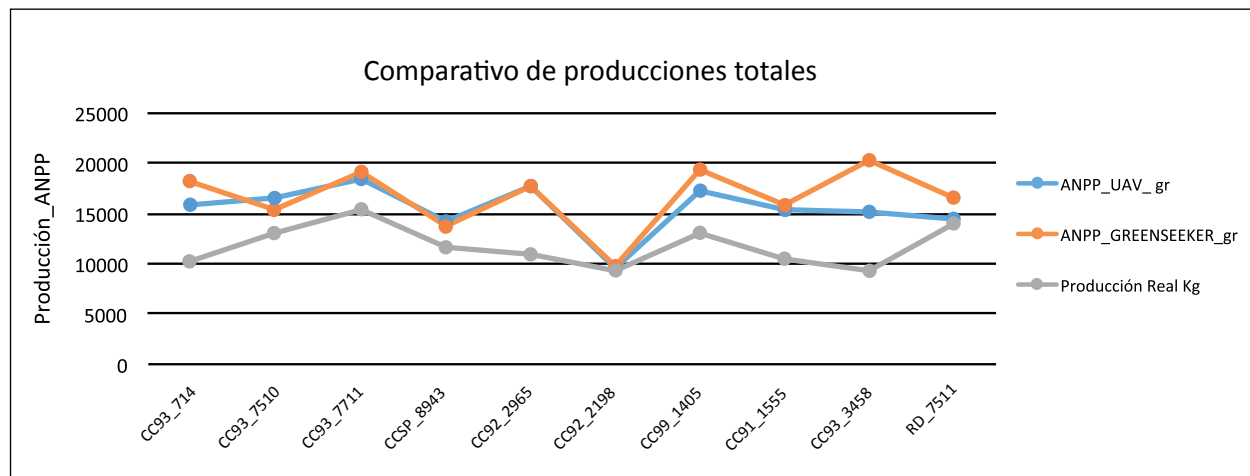


Figura 11. Relación entre los valores de PPN (ANPP) calculados y efectivamente medidos luego de cosechada la caña. Se muestran comportamientos similares pero desfasados.

Para explicar los resultados calculados e intentar acercarlos a los reales, en la figura 12 se muestra la regresión lineal de la relación entre PPN, en el gráfico ANNP vs. NDVI, con

función lineal ANNP (NDVI) = 107,7 NDVI + 35,11 y $R^2 = 0,99$, es posible comprobar que la estimación de la producción es dependiente linealmente del parámetro NDVI.

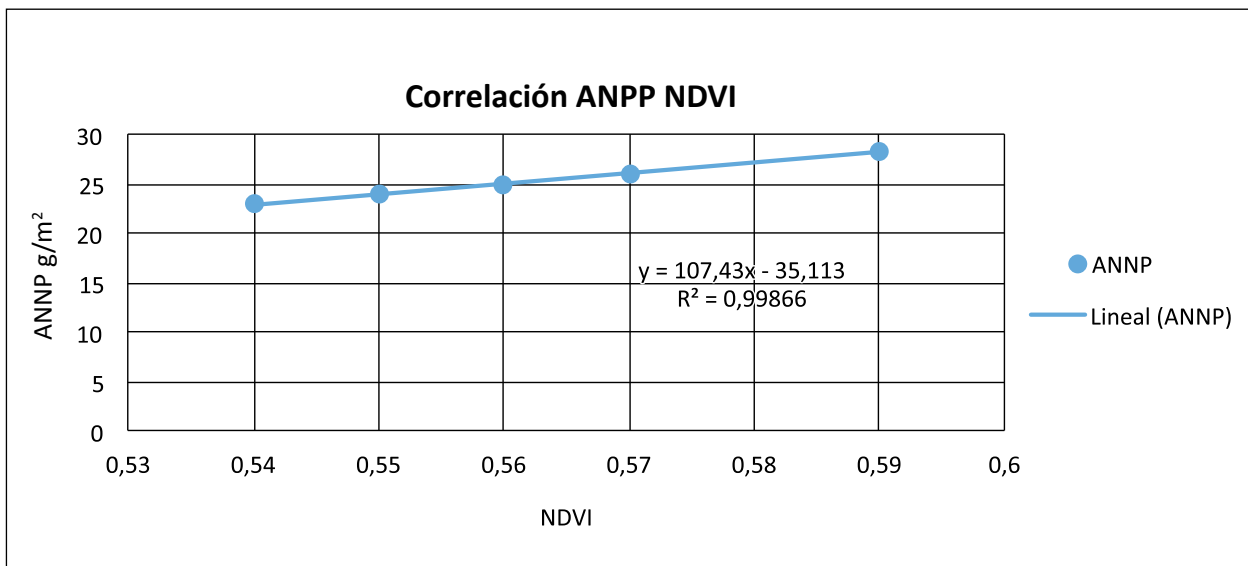


Figura 12. Regresión lineal entre datos PPN NDVI. Comportamiento de la variable biofísica y la ganancia de biomasa de la planta.

Conclusiones

El análisis químico practicado en las variedades en estudio y los altos índices de acidez detectados no produjeron variaciones importantes en los valores de NDVI medidos, a pesar que los valores de pH por debajo de 0,4 provocan estrés en la planta, se puede intuir que para las muestras en estudio la acidez del suelo no afecta significativamente la producción.

Se encontró una sutil relación entre la humedad, la acidez y la altura. En la parcela estudiada, la acidez del terreno aumenta con la altura (su explicación puede estar en el origen geofísico de la parcela); así mismo, la humedad varía directamente con la altura, posiblemente existan corrientes de viento provenientes del río Suárez que impacten en la parte alta de la parcela.

La comparación entre los valores de NDVI calculados a través del *software* GreenSeeker y los hechos a partir de las imágenes registradas por el UAV, no mostraron variaciones importantes ($R^2 = 0,015$) entre los dos tipos de valores calculados, debido a que los métodos son complementarios y varían solo los modelos. Así mismo, el cálculo del parámetro $fPAR$, al usar los modelos de Asrar et al. (1984), Wiegand et al. (1991) y Potter et al.

(1993) no varía significativamente, pues los modelos son mutuamente validados, aunque pueden existir algunas limitaciones en sus alcances por particularidades de parámetros no tomados en cuenta.

El uso de herramientas como los SIG fortalecen los procesos de toma de decisiones agronómicas, con lo que se enriquecen los criterios de selección sobre variedades que inicien en el proceso de adaptación a zonas con condiciones específicas.

La elaboración de proyectos en colaboración entre grupos o centros de investigación, así como entre universidades, aporta a cerrar la brecha tecnológica en la cadena productiva de la panela en áreas como:

- Articulación del potencial investigador que se genera en la academia y centros de investigación, y las necesidades puntuales del sector a través del fortalecimiento y direccionamiento de esfuerzos.
- El bajo nivel de transferencia en los estudios realizados para el sector desde la academia e instituciones privadas.
- Generación de unidades estratégicas y grupos puntuales.
- Atención a las demandas del sector a través de procesos de transferencia de tecnología.

Agradecimientos

A las entidades que acogieron el proyecto y le brindaron su apoyo como la Fundación Universitaria de San Gil (Unisangil), al Centro de Investigación para el Mejoramiento

de la Panela Cimpa-Corpoica en cabeza de su director, el ingeniero Julio Ramírez.

Sin la colaboración de estas dos instituciones en lo logístico y económico no se hubiese podido ejecutar el trabajo.

Referencias

- Abdel-Rahman EM, Ahmed FB. 2008. The application of remote sensing techniques to sugarcane (*Saccharum* spp. hybrid) production: a review of the literature. *Int J Remote Sens.* 29(13):3753-3767.
- Akmal M, Janssens MJJ. 2004. Productivity and light use efficiency of perennial ryegrass with contrasting water and nitrogen supplies. *Field Crop Res.* 88(2-3):143-155.
- Asrar G, Fuchs M, Kanemasu ET, Hatfield JL. 1984 Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. *Agron J.* 76(2):300-306.
- Bégué A, Todoroff P, Pater J. 2008. Multi-time scale analysis of sugarcane within-field variability: improved crop diagnosis using satellite time series? *Precision Agric.* 9(3):161-171.
- Benefetti R, Rossini P. 1993. On the use of NDVI profiles as a tool for agricultural statistics: the case study of wheat yield estimates and forecast in Emilia Romagna. *Remote Sens Environ.* 45(3):311-326.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística. 2014. Encuesta Nacional Agropecuaria-ENA. Bogotá: DANE; [consultado 2015 mar 18]. http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuario/enda/ena/2013/cp_ena_2013.pdf.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística. 2013. Encuesta Nacional Agropecuaria. Bogotá: DANE; [consultado 2014 jul]. <http://www.dane.gov.co/index.php/agropecuario/encuesta-nacional-agropecuaria>.
- Elmore AJ, Xun Shib NJ, Gorenceb NJ, Xia L, Jin H, Wang F, Zhang X. 2008. Spatial distribution of agricultural residue from rice for potential biofuel production in China. *Biomass Bioenerg.* 32(1):22-27.
- Epiphanyo JCN, Gleriani JM, Formaggio AR, Rudorff BFT. 1996. Índices de vegetação no sensoriamento remoto da cultura do feijão. *Pesq Agropec Bras.* 31(6):445-454.
- Field CB, Randerson JT, Malmström CM. 1995 Global net primary production: combining ecology and remote sensing. *Remote Sens Environ.* 51(1):74-88.
- Fortes C. 2003. Discriminação varietal e estimativa de produtividade agroindustrial de cana de açúcar pelo sensor orbital ETM + LANDSAT 7 Piracá [tesis de maestría]. [Sao Paulo]: Universidad de Sao Paulo.
- Gower ST, Kucharik CJ, Norman JM. 1999. Direct and indirect estimation of leaf area index, fAPAR and net primary production of terrestrial ecosystems. *Remote Sens Environ.* 70(1):29-51.
- Instituto Nacional de Vigilancia de Medicamentos y Alimentos, Federación Nacional de Producción de Panela. 2009. ABC de la panela. Bogotá: Fedepanela; [consultado 2014 jul]. <http://www.fedepanela.org.co/index.php/publicaciones/cartillas/4-abc-de-la-panela>.
- Ji-hua M, Bing-fang W. 2008. Study on the crop condition monitoring methods with remote sensing. En: *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.* Vol. XXXVII. Part B8; [consultado 2015 mar 19]. http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/8_pdf/10_WG-VIII-10/05.pdf.
- Krishna PV, Venkateswara V, Venkataratnam L. 2002. Remote sensing: a technology for assessment of sugarcane crop acreage and yield. *Sugartech.* 4(3-4):97-101.
- Kumar M, Monteith JL. 1981. Remote sensing of crop growth. En: Smith H, editor. *Plants and the daylight spectrum.* Londres: Academic Press. pp. 133-144.
- Lucas AA, Shuler CAB. 2007. Análise do NDVI/NOAA em cana de açúcar Mata Atlântica no litoral norte de Pernambuco, Brasil. *Rev Bras Eng Agríc Ambient.* 11(6):607-614.
- MarkSim™. 2011, DSSAT weather file generator and climate agriculture and food security, software; [consultado 2015 mar 19]. <http://gismap.ciat.cgiar.org/MarkSimGCM/>.
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. 2013. Informe rendición de cuentas. Bogotá: Minagricultura; [consultado 2015 mar 18]. https://www.minagricultura.gov.co/atencion-ciudadano/Informes%20de%20Gestin%20al%20Ciudadano/Informe_rendicion_cuentas.pdf.
- Monteith JL. 1972. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *J Appl Ecol.* 9(3):747-766.
- Osorio LA, Piñeros V, Ramírez JD, Rodríguez FL, Rua Y. 2015. El producto interno bruto. Cartago: Corporación de Estudios Tecnológicos del Norte del Valle; [consultado 2015 mar 18]. [https://luisgodocente.wikispaces.com/file/view/TRABAJO+DE+ECONOMIA+EL+PIB+\(1\).pdf](https://luisgodocente.wikispaces.com/file/view/TRABAJO+DE+ECONOMIA+EL+PIB+(1).pdf).
- Picoli MCA. 2006. Estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar utilizando agregados de redes neurais artificiais: Estudo de caso usina Catanduva [tesis de maestría]. São José dos Campos: INPE.
- Potter CS, Randerson JT, Field CB, Matson PA, Vitousek PM, Mooney HA, Klooster SA. 1993. Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data. *Global Biogeochem Cy.* 7(4):811-841.
- Rahman R, Islam H, Rahman A. 2004. NDVI Derived Sugar cane area identification and crop condition assessment. En: *Planpuls.* Bangladesh: Khula University; [consultado 2015 mar 18]. <http://ftp.idu.liu.se/~746A27/Literature/NDVI%20derived%20sugar%20cane%20area%20identification.pdf>.
- Roeckner E, Bäuml L, Brokopf R, Esch M, Giorgetta M, Hagemann S, Kirchner I, Kornbluh L, Manzini E, Rhodin A, et al. 2003. The atmospheric general circulation model ECHAM5. Part I. Report 349. Hamburgo: Max Planck Institute for Meteorology.

- Rudorff BFT, Batista GT. 1990. Yield estimation of sugarcane based on agrometeorological-spectral models. *Remote Sens Environ.* 33(3):183-192.
- Ruimy A, Saugier B, Dedieu G. 1994. Methodology for the estimation of terrestrial net primary production from remotely sensed data. *J Geophys Res.* 99(D3):5263-5283.
- Simões M, Rocha J, Lamparelli RA. 2005. Spectral variables, growth analysis and yield of sugarcane. *Sci Agric (Piracicaba, Braz).* 62(3):199-207.
- Soria-Ruiz, J. 2004. Methodology for prediction of corn yield using remote sensing satellite data in Central Mexico. *Investi Geog.* (55):61-78.
- Sugar Research and Development Corporation. 2007. SRDC Technical Report 3/2007. Precision agriculture options for the Australian sugarcane industry. Brisbane: Sugar Research and Development Corporation.
- Tucker CJ. 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sens Environ.* 8(2):127-150.
- Turner BL, Papházy MJ, Haygarth PM, McKelvie ID. 2002. Inositol phosphates in the environment. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci.* 357(1420):449-469.
- Ueno M, Kawamitsu Y, Sun L, Taira E, Maeda K. 2005. Combined applications of NIR, RS, and GIS for sustainable sugarcane production. *Sugarcane International.* 23(4):8-11.
- Wiegand CL, Richardson AJ, Escobar DE. (1991). Vegetation indices in crop assessment. *Remote Sens Environ.* 35(1-3):105-119.
- Xavier AC, Vettorazzi CA, Machado R E. 2004. Relação entre índice de área foliar e frações de componentes puros do modelo linear de mistura espectral, usando imagens ETM+/Landsat. *Eng Agríc.* 24(2):421-430.