

## Evaluación agroindustrial del cultivo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) mediante imágenes SPOT 5 HRV en la Huasteca México

Noé Aguilar-Rivera<sup>1,3</sup>; Guadalupe Galindo Mendoza<sup>2</sup>; Javier Fortanelli Martínez<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Veracruzana, Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Km. 1 Carretera Peñuela Amatlan de los Reyes S/N. C.P. 94945, Córdoba, Veracruz México; <sup>2</sup>Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Av. Sierra Leona # 550, Col. Lomas 2a. Sección C.P. 78210 San Luis Potosí S.L.P. México; <sup>3</sup>naguilar@uv.mx

Aguilar-Rivera, Noé; Guadalupe Galindo Mendoza; Javier Fortanelli Martínez (2012) Evaluación agroindustrial del cultivo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) mediante imágenes SPOT 5 HRV en la Huasteca México. Rev. Fac. Agron. Vol 111 (2): 64-74

El principal uso de los sensores remotos (RS) y los sistemas de información geográfica (SIG) en el cultivo de caña de azúcar, son la identificación, mapeo, evaluación, seguimiento, manejo y gestión del dosel mediante la interpretación visual o clasificación de imágenes así como caracterizar la fenología, el rendimiento del cultivo, variedad o estrés hídrico. Las imágenes SPOT 5 HRV se han utilizado ampliamente en la identificación de la vegetación a escala regional debido a su alta resolución. El objetivo de este estudio fue investigar la utilidad de las imágenes SPOT 5 HRV y el algoritmo de clasificación supervisada de máxima verosimilitud para la identificación, evaluación y elaboración de cartografía del cultivo de caña de azúcar en "La Huasteca" México. Las imágenes para el sitio de estudio fueron capturadas en junio del 2008; la metodología se basó en la diferenciación de firmas espectrales relacionadas con la productividad del cultivo de caña de azúcar. Los campos de entrenamiento fueron seleccionados y definidos por la interpretación visual con cuatro clases de productividad (alta, media, baja y muy baja). Los resultados mostraron que es posible identificar y mapear el cultivo de caña de azúcar con imágenes SPOT 5 HRV y establecer que, en la región cañera de la Huasteca, tan solo el 48.8 % de la superficie cultivada tiene media a alta productividad, el resto presenta problemas que deberían atenderse mediante acciones de manejo de sitio específico para incrementar la productividad en el mediano plazo.

**Palabras clave:** SPOT 5 HRV, teledetección, productividad agrícola, caña de azúcar, región Huasteca.

Aguilar-Rivera, Noé; Guadalupe Galindo Mendoza; Javier Fortanelli Martínez (2012) Agro-industrial evaluation sugarcane crop (*Saccharum officinarum* L.) by SPOT 5 HRV imagery in Huasteca Mexico. Rev. Fac. Agron. Vol 111 (2): 64-74

The principal use of remote sensing (RS) and geographical information system (GIS) in sugarcane crop, are identifying, mapping, evaluating, monitoring and management. It's possible by visual interpretation or image classification to characterize sugarcane phenology, crop yield, variety or water stress. SPOT 5 HRV images has been used extensively in field of vegetation identification at regional scale due to its high resolution. The goal was to investigate the utility of SPOT 5 HRV images and supervised maximum likelihood algorithm in the identification, evaluation and mapping of sugarcane at "La Huasteca" Mexico. Study site images were captured in June 2008, the methodology was based on the difference in spectral signatures between sugarcane productivity allowing a maximum likelihood multi spectral classification. Training fields were selected and defined by visual interpretation, in fourth classes (high, medium, low and lowest). Results showed that it is possible identify and map sugarcane using SPOT 5 HRV images and it was determined that in the sugarcane Huasteca region only 48.8% has medium to high productivity, the rest had problems to be addressed through site specific land management to increase productivity in the early future.

**Keywords:** SPOT 5 HRV; remote sensing, agricultural productivity, Sugarcane, Huasteca region.

Recibido: 15/09/2011

Aceptado: 26/10/2012

Disponible on line: 15/01/2013

ISSN 0041-8676 - ISSN (on line) 1669-9513, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP, Argentina

## INTRODUCCIÓN

La aplicación de agricultura de precisión (AP); percepción remota (PR), Sistemas de información Geográfica (SIG) y sistemas de geo-posicionamiento global (GPS) en la producción de caña de azúcar, como cultura semi-perenne plantada en grandes áreas, ha sido investigada en numerosos países en: (1) clasificación y mapeo, (2) identificación de etapas fenológicas y unidades térmicas de crecimiento, (3) discriminación de variedades, (4) monitoreo del riego y estrés nutricional, (5) detección de daños por insectos plaga y enfermedades, (6) predicción de rendimientos y (7) manejo de residuos de cosecha (ElHajj, 2009; Galvão *et al.*, 2006; Bappel *et al.*, 2005) Sin embargo, en México, no se ha logrado establecer una asociación con los trabajos convencionales de muestreo y manejo en campo, ya que estos están basados exclusivamente en datos históricos como el desarrollo de la zafra anterior, las condiciones agroclimáticas pasadas y previstas, el estado del cañaveral, y las estimaciones de superficie, rendimientos culturales y fabriles realizadas en pre-zafra (ElHajj, 2009; Bongiovanni & Vincini, 2008; Daamen *et al.*, 2002). En este contexto, el uso de técnicas geomáticas permite obtener datos homogéneos de extensas superficies agrícolas y forestales y realizar análisis multi-temporales y mapeos en tiempo real y de forma rápida, sinóptica, y relativamente accesible de las diferencias en el vigor de los cultivos (variaciones de la biomasa) e integrando las características bioquímicas y biofísicas del dosel, ayudando a orientar el muestreo y evaluación del potencial de producción de una superficie cultivada (Machado, 2007; Almeida *et al.*, 2006) y tiene la ventaja de integrar información procedente de diversas disciplinas tales como la meteorología, climatología, edafología, manejo de cultivos, fisiología vegetal y tecnologías de producción, con los factores espaciales (suelo, clima, topografía, infraestructura, etc) (Straschnoy *et al.*, 2006). Sin embargo, para cultivos de caña de azúcar, es necesario evaluar los factores que influyen, en el tiempo y espacio, en la respuesta espectral del dosel en sensores remotos (Aguilar *et al.*, 2010; Gonçalves, 2008; Fortes, 2003). Esto tiene relación con autores como Murillo & Osorio (2009) quienes reportaron que la interacción ingenio-zona agroecológica evidencia que el manejo agroecológico, la evolución y el efecto de las prácticas agronómicas tienen un peso considerable en la respuesta espectral del cultivo de la caña y por tanto en la productividad de acuerdo a sus valores medios de producción en una temporalidad dada. Así, Las imágenes del sensor SPOT (*Satellite pour l'Observation de la Terre*) se han utilizado ampliamente en la identificación y clasificación de la vegetación en entornos de complejidad variable a gran escala, debido a su alta resolución (Cobbing, 2006) y a que la variabilidad espacial observada en las reflectancias es mínima cuando el tamaño del píxel es suficientemente grande para ser considerado como representativo (estadísticamente) de la mezcla suelo-vegetación (Russell, 2009; Upadhyay, 2008; Vicini, 2007; Pasqualini *et al.* 2005; Markham & Townshend, 1981). La resolución espacial de cada píxel en imágenes SPOT 5 HRV (High Resolution Visible) es de 20x20 y 10x10 metros. El modo multi banda registra

dos en el visible y dos en el infrarrojo (cercano y medio), como se muestra en la tabla 1

Tabla 1. Bandas espectrales en imágenes SPOT 5 HRV. (ElHajj, *et al.* 2008).

Bandas	Tamaño del píxel (m)	Rango espectral (nm)
Banda 1: (verde)	10	500 – 590
Banda 2: (rojo)	10	610 – 680
Banda 3: NIR (infrarrojo cercano)	10	780 – 890
Banda 4: MIR (infrarrojo medio)	20	1580 – 1750
Pancromatico	2.5-5.0	480-710

En relación a lo anterior, la alta resolución espacial de imágenes SPOT 5 HRV y algoritmos derivados como NDVI y clasificación supervisada han sido la principal fuente de información para la identificación, mapeo y evaluación de cultivos de caña de azúcar mediante la reflectancia en las cuatro bandas espectrales, verde, rojo, infrarrojo cercano (NIR) e infrarrojo medio (MIR) extraídas de las imágenes para cada sitio de estudio (Aguilar *et al.* 2010; El Hajj *et al.*, 2008; Abdel-Rhman & Ahmed, 2008, Abdel-Rhman *et al.*, 2009, Upadhyay, 2008; Yang *et al.*, 2008; Bongiovanni & Vincini, 2008; Begue *et al.*, 2008; Lu & Weng, 2007; Kuang Ning *et al.*, 2006; Lau Quan, 2005; Gers & Schmidt, 2001; Sirvastva *et al.*, 1999; Wiegand, 1996). En este sentido, el contraste más nítido en la reflectividad espectral se produce entre las bandas visibles, especialmente el rojo (alrededor de 0.645  $\mu\text{m}$ ), y el infrarrojo (0.7 a 1.3  $\mu\text{m}$ ) por lo tanto, cuanto mayor sea el contraste entre ambas bandas, mayor será el vigor de la vegetación, y más clara su discriminación frente a otros tipos de cubierta, como ha sido establecido previamente por varios autores (Ji-hua & Bing-Fang, 2008; Machado, 2007; Lucas & Schuler, 2007; Frasson, 2007; Krishna Rao *et al.*, 1999; Chuvieco, 1996). La información espectral de culturas agrícolas debe ser complementada con datos edafológicos y climáticos (Rudoff *et al.*, 2010). En este sentido, Farias *et al.* (2003) concluyeron que la productividad de los cultivos varía espacialmente y determinar las causas de estas variaciones es fundamental para el establecimiento de áreas específicas de gestión y manejo mediante la separación de ambientes, manejo de residuos, resiembra, control de maleza, fertilización, riego y aplicación de madurador, y la asignación de variedades adaptadas a las limitaciones impuestas por las propiedades del suelo y el clima. Los datos de SPOT 5 HRV podrían ser más adecuados en áreas donde los lotes son pequeños debido a su resolución espacial (10 m), pero su baja frecuencia temporal y la posibilidad de cobertura nubosa durante sus pasadas poco frecuentes, limitan la obtención de parámetros biofísicos del cultivo que cambian durante la estación de crecimiento (Doraiswamy *et al.*, 2004). Para SPOT 5 HRV, la literatura reporta que la reflectancia en las banda 3 y 4 se correlacionan significativamente con el número de tallos por hectárea, y es una herramienta para predecir

el rendimiento, la edad del cultivo y el momento de la cosecha (El Hajj *et al.*, 2008; Lebourgeois *et al.*, 2007; Gers, 2001). Asimismo, Upadhyay (2008); Kuang Ning *et al.* (2006); Gers & Schmidt (2001); Sirvasta *et al.* (1999) y Krinsha *et al.* (1999) afirmaron que en imágenes SPOT 5 HRV, la caña de azúcar puede ser detectada a partir de los primeros 120 días del crecimiento activo del cultivo después de la siembra (plantillas) o rebrote después de la cosecha (socas) mediante el estudio de sus firmas espectrales y algoritmos de clasificación.

#### **Firmas espectrales y clasificación supervisada.**

Las firmas espectrales pueden caracterizar un cultivo de acuerdo a sus propiedades ópticas derivadas de condiciones de manejo (Narciso & Schmidt, 1999). Los sensores remotos e imágenes satelitales proveen esta información en tiempo real, debido su capacidad para medir indicadores biofísicos y detectar su variabilidad espacial (Brizuela, 2007). Sin embargo, durante el procesamiento de imágenes de satélite, se introducen algunos errores dejando áreas o píxeles aislados o grupos de píxeles que deben ser correctamente reclasificados; Rudorff *et al.*, (2010) concluyeron que estas áreas pueden ser extraídas por una técnica de clasificación, basada en la firma espectral del cultivo, que es capaz de minimizar errores al partir de un cierto conocimiento de la zona a clasificar, adquirido por experiencia previa o por trabajos de campo y propiedades espectrales similares y geometría asociada a una escala de un píxel estadísticamente similares (Zarco-Hidalgo *et al.*, 2008). Esto permite delimitar áreas representativas de las categorías analizadas (sitios de entrenamiento) en la etapa de interpretación y para la verificación posterior de los resultados (Chuvieco, 1996). La clasificación digital de la imagen permite reducir la variable continua o niveles digitales ND a una sola categoría o reducir errores (Pathirana, 1999). Los ND son la traducción digital de un flujo energético recibido por un sensor para una determinada banda del espectro, es decir, valores que representan la intensidad de la respuesta espectral de un píxel, de acuerdo a la capacidad de almacenamiento de la imagen (bits, en valores de 0-255). La clasificación de imágenes puede catalogarse en supervisada y no supervisada. La clasificación supervisada parte de un conjunto de clases conocido a priori. Estas clases deben caracterizarse en función del conjunto de variables mediante la medición de las mismas en individuos cuya pertenencia a una de las clases no presente dudas (Lu & Weng, 2007). El clasificador más empleado en culturas agrícolas es el de Máxima verosimilitud (*Maximum Likelihood MXL*). Este clasificador es el más complejo y, por lo tanto, el que mayor volumen de cálculo requiere, ya que se ajusta fielmente a la distribución original de los datos (Chuvieco, 1996) además de considerarse uno de los procedimientos de discriminación más robustos, acertados y eficientes (Maselli *et al.*, 1992). El

clasificador evalúa la probabilidad de que un píxel pertenezca a una categoría o clase específica predeterminada a la que tenga mayor probabilidad de pertenecer con distribución normal y lo asigna a aquella de valor máximo de ND equivalentes de la imagen original a una variable física con un significado estándar (García-Mora, 2006). Bajo el enfoque unitemporal o de observación en fecha única basado en una clasificación de Máxima verosimilitud esta técnica ha sido empleada para clasificar predios con caña de azúcar por Yang *et al.* (2008); Yang & Everitt (2011); Vikesh & Kamal (2010); Soria (2007, 2002); Soria & Ortiz-Solorio (2009); Kuang Ning *et al.* (2006); Bappel *et al.* (2005); Apan (2004); Dadhwal *et al.* (2002); Gers & Schmidt (2001) y Pathirana, (1999) con imágenes *Thematic Mapper* (TM) y SPOT. El objetivo de este estudio fue evaluar y clasificar el cultivo de caña en la Huasteca por el método de máxima verosimilitud mediante imágenes SPOT 5 HRV, para delimitar la superficie cañera por niveles de productividad.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

### **Área de Estudio.**

La región conocida como "Huasteca", (su nombre se deriva de la palabra *Huaxtlán* que significa lugar donde abunda el Huaxi o Guaje) comprende once municipios productores de caña de azúcar; se localiza en la parte oriental del estado de San Luis Potosí; tiene como límites, por el occidente a la Sierra Madre Oriental, y a los estados de Tamaulipas al norte, Veracruz al este, e Hidalgo y Querétaro por el sur. Comprende tres grandes zonas agrícolas: cafetalera-piloncillera (indígena) ubicada en la sierra alta de la parte oeste de la región; citrícola-piloncillera (mestiza-indígena) localizada en la sierra baja de la porción centro sur; y la cañera-ganadera (mestiza) que se concentra en el área de la planicie y lomeríos suaves en la parte noreste (Figura 1).

La región se caracteriza en torno a los siguientes factores:

1. Un patrón de cultivos definido por la presencia de monocultivos como el del café, la caña para trapiches e ingenios y los cítricos.
2. Niveles de rendimiento por debajo de los promedios nacionales en los cultivos comerciales de referencia.
3. Disminución en los rendimientos de los cultivos básicos, producto de la erosión y otros factores ambientales y socio-económicos.
4. Precios de venta de los productos agrícolas que tienden a ser más bajos que los precios de producción, particularmente en producción de básicos, piloncillo y cítricos donde las unidades de producción, en su mayoría son inferiores a dos hectáreas.

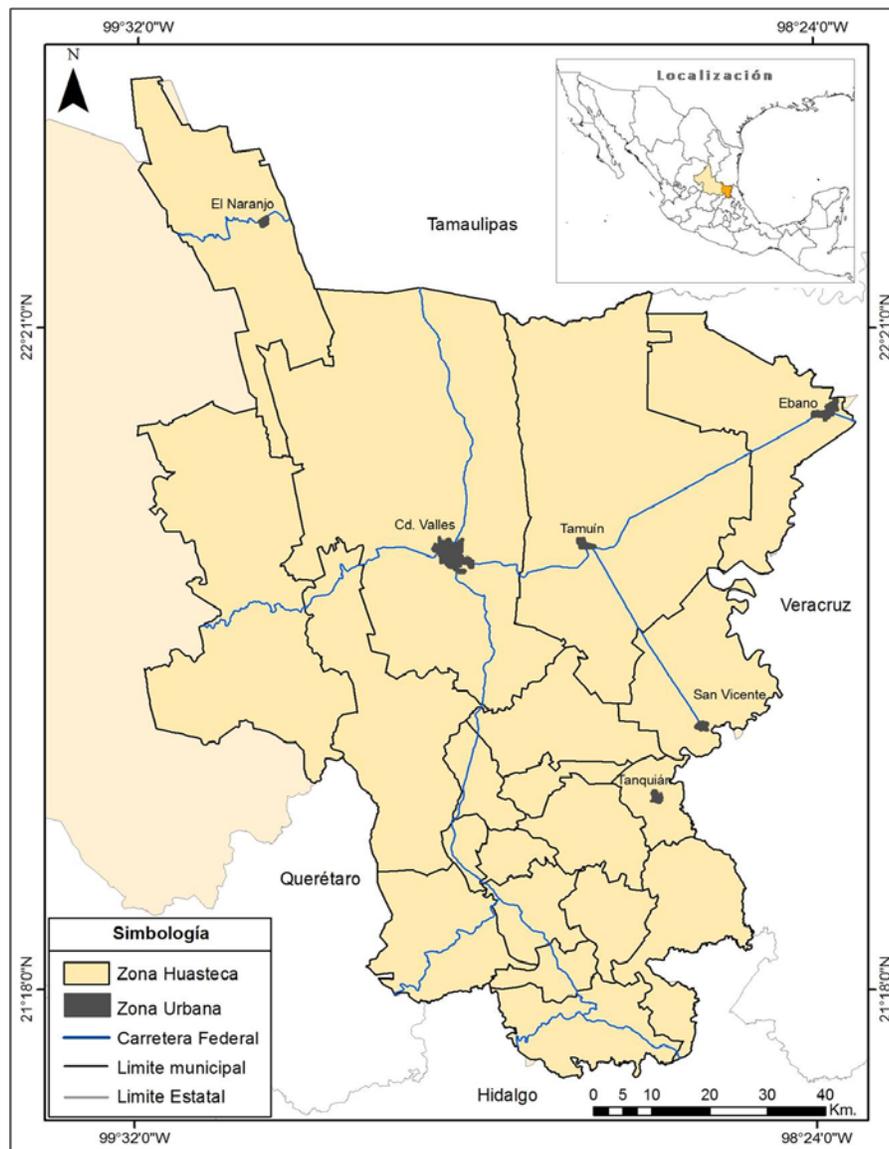


Figura 1. Ubicación de la Huasteca dentro del estado de San Luis Potosí México

#### Identificación del área cañera.

Sobre la base de la resolución espacial del SPOT 5 HRV (10m) se generó un mosaico de 11 imágenes con el software ILWIS 3.3 de la zona cañera de la Huasteca San Luis Potosí México y se georeferenciaron los cuatro ingenios azucareros de la zona de estudio con un equipo GPS Garmin modelo GPSmap 60CSx (Alianza Popular, Plan de Ayala, San Miguel El Naranjo y Plan de San Luis), los cuales se dedican a la fabricación de azúcar crudo y refinado. Estas imágenes presentaron resolución espacial de 10 y 20 m, tamaño 60x60 km (3,600 km<sup>2</sup>), resolución radiométrica 256 ND, corresponden a Junio del 2008, las cuales fueron corregidas geográficamente empleando el *Datum* Norteamericano de 1927 y la proyección Universal Transversal de Mercator (UTM zona 14 Norte) y Esferoide WGS84 que cubren el 100 % del área cañera de la Huasteca. Las firmas espectrales se

determinaron de acuerdo a las clases de productividad previamente establecidas (Alta, media, baja y muy baja) para los datos históricos de productividad de las zonas cañeras de México y lo reportado a nivel internacional por Abdel-Rhman *et al.* (2010 a,b); Soria *et al.* (2002) y Narciso & Schmidt (1999). En este sentido, se realizaron diferentes combinaciones de bandas con cada una de las imágenes del área cañera, y luego integradas como mosaico, para evaluar el estado de vigor vegetal de la zona cañera en la fecha de estudio. En este sentido, se seleccionó la composición falso color Infrarrojo cercano, Rojo, Verde (321) como fue sugerido por De Bie *et al.* (2008); Gonçalves (2008); Abdel-Rahman & Ahmed (2008); Zarco-Hidalgo *et al.* (2008); Jensen (2005) y Gers & Schmidt (2001) para discriminar niveles de productividad. La selección de lotes de control o campos de entrenamiento, para identificar las curvas de respuesta espectral de la caña

de azúcar con diferente productividad, se llevo a cabo conforme a la información de campo obtenida directamente por el departamento de campo de los ingenios azucareros en la zona de estudio y de trabajos previos publicados en caña de azúcar para otras zonas (Yang & Everitt, 2011; Galindo *et al.*, 2009; Johnson *et al.*, 2008; Galvão *et al.*, 2005; Bowker & Davies, 1985). Se dispuso de 6678 puntos de control distribuidos en el área cañera de acuerdo a los rangos de productividad preestablecidos y al criterio establecido por Chuvieco (1996), que a mayor ND, mayor reflectividad, es decir, cuanto mayor sea el valor de ND mayor es la radiación que recibe el sensor derivada de la actividad del dosel (Tabla 2).

Tabla 2. Puntos o lotes de control por nivel de productividad

Nivel de Productividad	Puntos de control (No. Pixeles)	ND
Alto	2072	>200
Medio	2116	150-200
Bajo	1537	100-150
Muy Bajo	953	<100

### Calidad de caña

Para establecer la relación entre la respuesta espectral de la caña y la calidad agroindustrial (validación del modelo), se establecieron sitios georeferenciados de muestreo (700 en total) en el campo de los ingenios azucareros de la región durante la fase inicial de la zafra 2009/2010 (final del ciclo fenológico), seleccionados con base en el mapa de productividad cañera obtenido para evaluar parámetros agroindustriales: altura de planta (m), longitud de tallos (m), número de entrenudos, longitud del entrenudo (cm) diámetro del tallo (mm) y azúcares/sólidos totales (Brix % jugo), índice de madurez, azúcares reductores %, pureza (pol % jugo), fibra % caña, (Zossi *et al.*, 2010; Romero, 2009; Rincon, 2005). Para medir los sólidos totales o azúcares presentes en el jugo de la caña, se picaron los tallos por la parte media con un punzón para extraer el jugo; una gota tomada inmediatamente después del corte, fue depositada sobre el refractómetro digital de mano, marca Atago modelo PAL-1 con graduaciones de 0 a 53% y precisión de 0.1 % derivada del cuarto entrenudo hacia arriba de la base del tallo y en el cuarto entrenudo hacia abajo de la parte apical del tallo. El índice de madurez se obtuvo mediante la relación entre los grados Brix de la parte apical con los de la base del tallo. Se procedió a ordenar los datos en tablas de frecuencia con cinco intervalos de clase.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La figura 2 representa la firma espectral de cada clase de productividad cañera en la zona de estudio.

La tendencia de cada clase se relaciona directamente con los parámetros ópticos resultantes de la productividad cañera que explican el comportamiento de la hoja ante la radiación obtenidas por diversos investigadores para caña de azúcar (Auynirundronkool *et al.*, 2008; Johnson *et al.* 2008; Galvão *et al.*, 2005; Bowker & Davies, 1985). En este sentido, Johnson *et al.* (2008) establecieron que la respuesta espectral de caña de azúcar es significativa en longitudes de onda entre 510 – 550, 580 - 620 nm y hasta 720 nm) que pueden usarse incluso para discriminar entre diversas variedades de caña, debido a su alta actividad fotosintética y al ser la planta C4 que mayor eficiencia presenta, como fue discutido previamente por Waclawovsky (2010); Moore, (2009) y De Souza-Rolim, (2008) que tipifican a la caña de azúcar como una planta de alta rusticidad, sobresaliente capacidad de adaptación, elevado potencial de producción y conversión de energía solar.

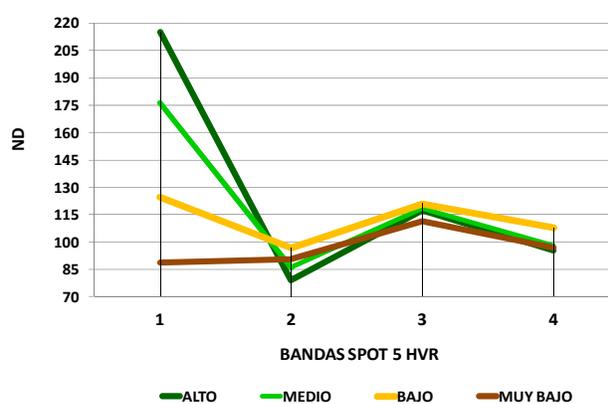


Figura 2. Firma espectral de los polígonos cañeros por nivel de productividad

La comparación de los niveles digitales (ND) de cada clase de productividad cañera obtenidos para las distintas bandas involucradas en las firmas espectrales de la zona cañera de estudio, y de acuerdo a Chuvieco (1996) permitió establecer que la categoría clasificada como ALTO, presenta las características de una vegetación vigorosa; muestra un máximo relativo (215.2 ND) en la porción verde del espectro (banda 1 tabla 1) y un mínimo (95.5 ND) en el rojo (banda 2), este valor en coincidencia a los valores en esta banda para las categorías BAJO y MUY BAJO, derivado de la actividad fotosintética decreciente en esta zona de estudio. En este sentido, Huang *et al.* (2005) concluyeron que la máxima sensibilidad al contenido de clorofila en las hojas de caña de azúcar, como planta C4, es 550 (banda 1, pico de reflectancia verde) y 710 nm (banda 3) por cambios estructurales de la clorofila y otros pigmentos y a un aumento considerable en el infrarrojo cercano y medio a 760-900 nm y 1550-1750 nm respectivamente por cambios drásticos en el nivel de vigor vegetal, en el cual la estructura geométrica interna y dimensiones de las hojas, por cambios en la orientación y disminución del área foliar y del dosel

derivado de condiciones de manejo y gestión y de condiciones ambientales en cultivos de secano de la zona de estudio, como factores dominantes que impactan principalmente en los cambios ocurridos en cloroplastos y vacuolas de acuerdo a lo reportado por Kridsakron *et al.* (2008); Machado (2007) y Almeida-Silva & Bremm-Soares (2008). En este sentido, Upadhyay (2008); Lisson *et al.* (2005) y Pellegrino (2001) mencionaron para caña de azúcar, que bajo condiciones ambientales extremas de secano, la cantidad de hojas verdes activas disminuye y la paja u hojas secas resultantes se hacen visibles y empiezan a influir en el valor de reflectancia debido al incremento en el índice refractivo de la capa del mesófilo cuando el agua es reemplazada por aire (interfaz pared celular/aire) y por los efectos indirectos de la sequía en la hoja, como la disminución del índice de área foliar o las sombras en la superficie del suelo expuesta debida al rizado de la hoja seca que corresponden a la señal adquirida en las bandas 2, 3 y 4. Caso contrario a la categoría clasificada como MUY BAJO, que presenta una línea recta en el espectro, derivado de la baja actividad fotosintética y humedad, debido a que en el

dominio del espectro del infrarrojo (700 a 1300 nm), la reflectividad de las hojas es controlada por su estructura celular derivada de los gradientes de humedad (Curran, 2001, 1990) y esta categoría corresponde a hojas senescentes o plantas sometidas a algún tipo de estrés (acame, sequia, plagas, nutrientes etc.) y las hojas huecas y secas de color amarillento resultantes modifican la arquitectura del dosel, eliminando el máximo relativo de la banda 1 (verde), y poseen mayor contenido de antocianinas y productividad cañera disminuida (< 50 t/ha). Así, se discriminaron la mayor parte de la información espectral en un rango de 39, 91 y 127 ND's, con valores mínimos de 88 y máximo de 215 ND's para la banda 1. En cambio, las bandas 3 y 4 del sector infrarrojo presentaron rangos de 111 a 121 ND's, y 95 a 107 respectivamente en sus valores mínimo y máximo, lo que establece la sensibilidad del sensor SPOT 5 HVR a la actividad fotosintética del dosel de caña de azúcar. Para la generación de la distribución espacial cañera, cálculo de la superficie y la zonificación por nivel de productividad se empleo software ESRI ArcGis 9.2. (Figura 3 y Tabla 3).

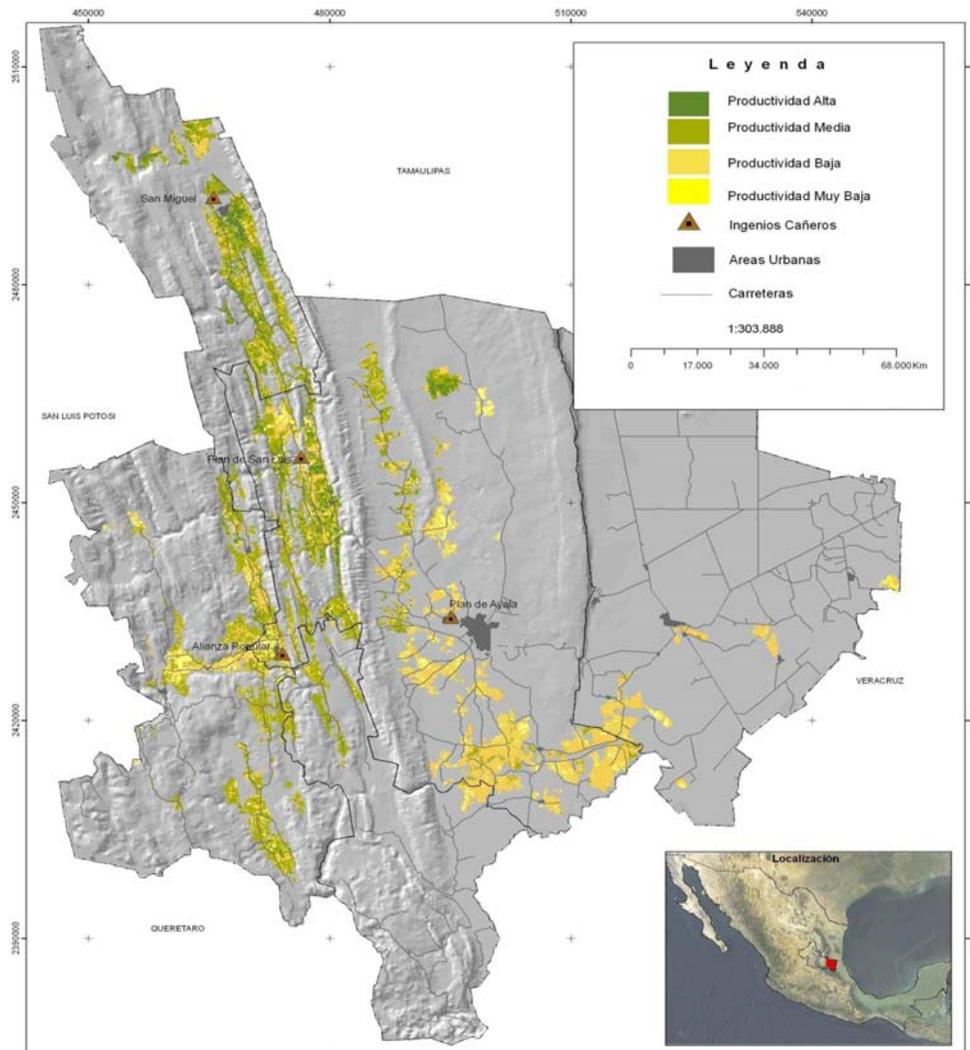


Figura 3. Distribución espacial de la zona cañera por nivel de productividad.

Tabla 3. Superficie cañera por nivel de productividad

Productividad	Superficie (ha)
Alta (Mayor a 70 t/ha)	7,116.07
Media (70 a 60 t/ha)	36,368.10
Baja (60 a 50 t/ha)	36,297.63
Muy Baja (Menor a 50 t/ha)	9,376.84
Total	89,158.64

Conforme lo que se puede apreciar en el mapa temático, los rendimientos de nivel alto e intermedio se concentran y dispersan en la zona norte de las áreas cañeras cercanas a los ingenios y los cuerpos de agua, los de rendimiento, bajo y muy bajo se agrupan alrededor de los anteriores localizándose

preponderantemente en la zona centro y sur. De acuerdo a esta clasificación se observo que las clases suman el 100 % del área cañera identificada. Según Johnson *et al.* (2008) y Johnson & Kindsey-Anderson (1997), la importancia económica de la caña de azúcar justifica los estudios de la variabilidad espacial de atributos del suelo y otros factores ambientales limitantes. El uso de estas técnicas, podría proporcionar una mayor comprensión de las variaciones en el cultivo para aplicar a un sistema comercial que reduzca la variabilidad y factores limitantes y permitir el establecimiento de la planificación agrícola adecuada, es decir, zonificación agroecológica (ZAE), lotificaciones o ambientes productivos etc. En las Tablas 4, 5 y 6 se presentan los resultados obtenidos de las características propias del tallo y de toda la planta por zona productora.

Tabla 4. Características agroindustriales promedio en la zona cañera de la Huasteca

Zona productora	Brix inferior	Brix superior	Índice de madurez	Altura de la planta (m)	Longitud del tallo (m)	Longitud entrenudo (cm)	Diámetro del tallo (cm)	Numero de nudos
Alta	22.25	21.2	0.98	>3.0	2.75	17-20	>12	14-15
Media	20.5	20.8	1.02	2.5	1.98	13-15	9-11	12-13
Baja	21.1	20.6	0.98	1.95	1.80	10-12	7-9	13-17
Muy Baja	21	20.5	0.97	<1.80	1.60	7.5-10	<7.5	12-16

Tabla 5. Características promedio de calidad en la zona cañera de la Huasteca

Zona productora	Humedad (%)	Sacarosa POL (%)	Reductores (%)	Pureza (%)	Fibra (%)
Alta	68.07	17.494	0.228	90.46	12.72
Media	68.09	16.502	0.285	89.44	12.86
Baja	69.84	15.751	0.343	88.65	12.63
Muy baja	70.87	14.885	0.425	87.45	12.42

Tabla 6. Coeficiente de variación (CV %) por zona productora

Variable/Zona	Alta	Media	Baja	Muy baja
Sacarosa POL (%)	2.78	1.33	1.44	2.56
Humedad (%)	1.88	1.9	1.62	1.72
Reductores (%)	34.4	37.17	38.05	36.15
Brix (%)	3.01	2.42	2.7	3.33
Pureza (%)	4.2	1.84	2.22	2.34
Fibra (%)	7.32	7.86	8.15	9.78

### Región de alta productividad

El rango en que se encuentran los valores de pol va de 16.88 a 19.86 en el 88.01% de los sitios de muestreo, los valores de pol están agrupados en los intervalos de clase que van de 16.88 a 18.07%. El 88.64% de los valores de humedad se agrupan en los intervalos que fluctúan entre 66.6 y 69.9%, los cuales están por debajo de lo deseado que es de 73 a 75% de humedad en los tallos en el momento considerado como una caña madura. Los reductores en ningún sitio de muestreo superaron el 1%, encontrándose el 92.74% en un rango de 0.174 a 0.3724; en el caso de brix el 89.9% de los sitios de muestreo reportó valores que fluctuaron entre 18.59 y 20.28%. La pureza del jugo siempre fue superior al 80%. En el 82.18% de los sitios de muestreo sus valores se encontraron entre 89.05 y 93.81%. Con relación a la fibra solo el 0.3% se encuentra con valores superiores al 15%, mientras que el 98.58% fluctúa entre 10.25 y 13.89%. La desviación de los azúcares reductores (tabla 6) es impactada en la zona Huasteca por la variabilidad de las condiciones ambientales, debido a que el 75 % del área total es cultivo de secano y la logística de los diversos sistemas de cosecha (en la zona de estudio el sistema de quema y corte manual es 90 % y el mecanizado y corte verde 10 % del total plantado) y por el transporte y almacenaje de caña en el ingenio que puede permanecer en espera hasta 72 horas antes de ser molida en el ingenio con gran impacto en su calidad agroindustrial.

### Región de media productividad

En esta región el pol fluctúa entre 16.13 y 16.88%, encontrándose la mayor frecuencia (22.71%) entre 16.28 y 16.43%. En general hay uniformidad entre las frecuencias de los intervalos de clase. La humedad fluctúa entre 49.3 y 72.3%, donde el 83.75% de los valores están en el intervalo de 67.7 y 72.3%, este intervalo se encuentra por abajo del nivel deseado de humedad de los tallos en la sección 8-10. Los reductores fluctúan entre 0.176 y 0.816%, encontrándose el 91.0% entre 0.176 y 0.432%. El brix tiene un rango que va de 16.6 a 19.54, el 84.22% fluctúa entre 17.18 y 18.95%. La pureza del jugo fluctúa entre 83.21 y 93.65%, donde el 91% se localiza entre 85.30 y 91.56%. La fibra en caña se encuentra entre 8.15 y 15 (93%), pero solo el 7.25% de los valores esta en un intervalo que se puede considerar difícil para la extracción del jugo que va de 14.37 a 15.935%, el 92.58% fluctúa entre 9.71 y 14.37% de fibra.

### Región de baja productividad

En esta región, el pol fluctúa entre 15.37 y 16.13%, encontrándose la mayor frecuencia (23.60%) entre 15.37 y 15.52%, en general hay uniformidad entre las frecuencias de los cinco intervalos de clase. La humedad fluctúa entre 66.3 y 73.4%, de la cual el 96.53% están por debajo del nivel deseable y solo el 3.47% se localiza entre 71.98 y 73.4% y se acerca al nivel que mejor facilita la extracción y se correlaciona con una buena maduración. Los reductores se encuentran entre 0.175 y 0.922% en todos los casos dentro del rango que permite una buena cristalización. El brix se encuentra en un rango de 15.33 a 18.94%, con un 96.05% de los sitios de muestreo entre 16.77 y

18.94% de brix. La pureza tiene una variación entre 80.71 y 99.68%, con el 95.11% de los sitios entre 84.50 y 92.09%. La fibra fluctúa entre 9.73 y 15.85%, de lo cual solo el 4.57% se encuentra entre 14.62 y 15.85% lo que puede dificultar la extracción posterior de sacarosa en los molinos del ingenios.

### Región de muy baja productividad

El pol en jugo fluctuó entre 13.04 y 15.37%, encontrándose el 98.42% de los resultados en los intervalos comprendidos en el rango de 13.97 a 15.37% de pol en jugo. La humedad de los tallos fluctuó en un rango de 66.5 y 74.6%, encontrándose el 96.22% de los resultados en un rango de 66.5 y 72.98%, solo el 3.77% se encontró en el intervalo que va de 72.98 y 74.6% considerado como adecuado para una buena extracción. Los reductores fluctuaron en un rango de 0.051 y 1.08%, en donde solo el 0.94% se encontraron en un intervalo que va de 0.8966 a 1.108% el cual ya está en los niveles en que hay menor recuperación de azúcar lo cual impacta en aspectos económicos; los valores de brix se encontraron en un rango de 14.75 y 18.36%, mientras que el 98.42% se ubicó en un rango de 15.47 a 18.36%. Para el caso de pureza los valores fluctuaron en un rango de 79.76 a 92.68%, encontrándose el 99.53% en un rango de 82.34 y 92.68% y únicamente el 0.47% en el intervalo de 79.76 a 82.34%. Los valores de fibra se encontraron en un rango de 9.93 a 16.48%, el 99.21% se agruparon en el rango de 9.93 y 15.17% y solo el 0.79% en el intervalo de 15.17 y 16.48% en el que la extracción ya presenta dificultad. En este sentido, las medidas de los distintos componentes de la planta discriminaron los niveles de productividad. Bajo condiciones climáticas ideales (zona cañera de media a alta productividad), la caña de azúcar crece rápidamente, produciendo entrenudos relativamente grandes y gruesos, lo que indudablemente influirá en la cantidad de biomasa producida por unidad de superficie; así, pues a mayor producción total, mayor será el azúcar disponible para la fábrica. Cuando existe una deficiencia de los factores climáticos, edáficos o de manejo, relacionados con la productividad, el crecimiento de la caña de azúcar se torna más lento y los entrenudos más cortos y delgados (zona cañera de baja y muy baja productividad); es decir, su calidad y características agroindustriales se ven afectadas principalmente por factores tales como edad de corte, número de corte, porcentaje de floración, número de riegos, despoblación de cepas, precipitación y contenido de materia extraña en el momento de la cosecha. Si se toma en cuenta que estas son las zonas cañeras con mayor importancia desde el punto de vista económico en la Huasteca, deberían considerarse como posibles seleccionadas para llevar a cabo cambios significativos en las prácticas de manejo, para incrementar su productividad primaria neta, aun cuando su capacidad de producción de azúcar no sea la mejor.

## CONCLUSIONES.

Los resultados obtenidos, mediante metodologías geomáticas establecen que en la región cañera de la Huasteca tan solo el 48.8 % (43,484.17 ha) tiene media a alta productividad, el resto 45,674.47 ha (51.2 %) baja

o muy baja que presenta problemas que deben atenderse mediante acciones de manejo de sitio específico (variedades, riego, incorporación de materia orgánica, cosecha en verde, logística de transporte etc.). Estos resultados pueden ser utilizados como una herramienta de apoyo a la toma de decisiones en los procesos de planificación del área cañera, principalmente en zonas agrícolas de gran heterogeneidad, mediante la determinación y diferenciación de ambientes productivos y zonificación agroecológica para generar otros productos todavía más específicos y precisos de forma espacial. A pesar de que la clasificación de imágenes de satélite para identificar tipos de vegetación, de una zona en particular, depende de varios factores como la identificación hecha por el intérprete, los métodos utilizados, la escala de trabajo y las variaciones climáticas entre otros, los resultados encontrados en este trabajo son indicativos de una buena aproximación con la realidad. La información obtenida, validada por datos reales derivados del departamento de campo de los ingenios azucareros, permitió el análisis espacial debido a que hizo posible detectar el estado de vigor productivo de las zonas cañeras y permitió visualizar cuáles pueden ser las posibles tendencias de cambio en los sistemas de manejo para incrementar la productividad y representan un avance en la aportación de conocimientos acerca de la problemática que enfrenta esta área cañera.

## BIBLIOGRAFÍA

- Abdel-Rahman, E.M. & F. Ahmed.** 2008. The application of remote sensing techniques to sugarcane (*Saccharum spp. hybrid*) production: a review of the literature International Journal of Remote Sensing 29 (13) pp. 3753 – 3767
- Abdel-Rahman, E.M., F.B. Ahmed, M. Van Den Berg, M.J. Way.** 2010a. Potential of spectroscopic data sets for sugarcane thrips (*Fulmekiola serrata* Kobus) damage detection. International Journal of Remote Sensing 31 pp. 4199–4216.
- Abdel-Rahman, E.M., F.B. Ahmed, M. Van Den Berg.** 2010b. Estimation of sugarcane leaf nitrogen concentration using in situ spectroscopy. International Journal of applied Earth Observation and Geoinformation 12 pp. S52–S57.
- Abdel-Rahman, E.M., M. Van Den Berg, M.J. Way, F.B. Ahmed.** 2009. Handheld spectrometry for estimating thrips (*Fulmekiola serrata*) incidence in sugarcane. Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IV-268–IV-271.
- Aguilár, N.; G. Galindo, J. Fortanelli, C. Contreras.** 2010. Índice normalizado de vegetación en caña de azúcar en la Huasteca Potosina. Avances en Investigación Agropecuaria 14(2) pp. 29-48
- Almeida, T.I.R., C.R De Souza, R. Rossetto.** 2006. ASTER and Landsat ETM+ images applied to sugarcane yield forecast. International Journal of Remote Sensing 27(19): 4057–4069.
- Almeida-Silva, M. & R.A. Bremm-Soares.** 2008. Agronomic performance of sugarcane families in response to water stress Bragantia, Campinas, 67(3) pp. 655-661.
- Apan, A.** 2004. Spectral discrimination and classification of sugarcane varieties using EO-1 Hyperion Hyperspectral Imagery En: <http://www.a-a-r-s.org/acrs/proceeding/ACRS2004/Papers/HSS04-1.htm>
- Auynirundronkool, K., K. Deudomchan, A. Prakobya, V. Jarnkoon, M. Tintarasara Na Ratchasema, M. Seechan.** 2008. Analysis of Economic Crop Reflectance by Field Spectral Signature: Case Study Sugarcane En: <http://www.a-a-r-s.org/acrs/proceeding/ACRS2008/Papers/TS%2013.6.pdf>.
- Bappel, E., A. Bégué, P. Degenne, V. Lebourgeois, B. Siegmund.** 2005. Real-time sugarcane harvest monitoring using spot 4&5 satellite data. International Society of Sugar Cane Technologists (ISSCT), XXV Congress, Jan. 30- Feb. 4 2005, Guatemala.
- Begue, A., P. Todoroff, J. Pater.** 2008. Multi-time scale analysis of sugarcane within-field variability: improved crop diagnosis using satellite time series? Precision Agric. 9: 161–171.
- Bongiovanni, R. & L. Vicini.** 2008. Agricultura de Precisión en Caña de Azúcar, IDIA XXI Cultivos industriales VIII(10): 82-89.
- Bowker D.E & E. Davis.** 1985. Spectral Reflectances of Natural Targets for Use in Remote Sensing Studies National Aeronautics and Space Administration Scientific and Technical Information Branch Publication 1139. 188 pp.
- Brizuela A.P.** 2007. Establecimiento de índices espectrales en el diagnóstico nutrimental de nitrógeno en maíz. Agrociencia 41: 827-835.
- Chuvieco, E.** 1996. Fundamentos de teledetección espacial. Madrid: Ediciones RIALP. 568 pp.
- Cobbing, B.L.** 2006. The Use of Landsat ETM Imagery as a Suitable Data Capture Source for Alien Acacia Species for the WFW Program. Unpublished Masters Thesis. Rhodes University. Disponible en: <http://eprints.ru.ac.za/853/>. Último acceso: diciembre 2012.
- Curran, P.** 1990. Exploring the relationship between reflectance red edge and chlorophyll content in slash pine J Tree Physiology 7: 33-48.
- Curran, P.J.** 2001. Estimating the foliar biochemical concentration of leaves with reflectance spectrometry: Testing the Kokaly and Clark methodologies. Remote Sensing of Environment 76(3): 349-359.
- Daamen, M.L.J., J.V. Rocha, R.A.C. Lamparelli, J. Zullo.** 2002. Mapeamento da variabilidade espacial da produção da cultura de cana-de-açúcar por meio de processamento digital de imagens de satélite e análise de componentes principais. 2º Simpósio Internacional de Agricultura de Precisão. Viçosa, MG, 12 a 14 de junho de 2002.
- Dadhwal, V.K., R.P. Singh, S. Dutta, J.S. Parihar.** 2002. Remote sensing based crop inventory: A review of Indian experience Tropical Ecology 43(1): 107-122.
- De Bie, C.A., M.R. Khan, A.G. Toxopeus, V. Venus, A.K. Skidmore.** 2008. Hypertemporal image analysis for crop mapping and change detection. The International Archives of the Photogrammetry, Remote

- Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B7. Beijing, pp. 803-814.
- De Souza-Rolim, G.** 2008. Validation of the deardorff model for estimating energy balance components for a sugarcane crop. *Sci. Agric.* 658(4): 325-334.
- Doraiswamy, P.C., J.L. Hatfield, T.J. Jackson, J.H.B. Akhmedov, A.J. Stern.** 2004. Crop condition and yield simulations using Landsat and MODIS imagery. *Remote Sensing of Environment*, 92 : 548– 559.
- El Hajj, M., A. Begué, B. Lafrance, O. Hagolle, G. Dedieu, M. Rumeau.** 2008. Relative Radiometric Normalization and Atmospheric Correction of a SPOT 5 Time Series Sensors, 8 pp. 2774-2791.
- Farias, P.R.S.; L.A.S. Nociti, J.C. Barbosa, D. Perecin.** 2003. Agricultura de precisão: mapeamento da produtividade em pomares cítricos usando geostatística. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 25 (2): 235-241.
- Fortes, C.** 2003. Discriminação varietal e estimativa de produtividade agroindustrial de cana-de-açúcar pelo sensor orbital ETM+/Landsat7. 147 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ), Piracicaba.
- Frasson, R.F.** 2007. Comportamento temporal do NDVI mensurado com sensor óptico ativo para diferentes variedades de cana de acucar. *BioEng. Campinas* 1(3): 237-244.
- Galindo, M.G., C. Contreras & S.L. Olvera.** 2009. Metodología para determinar zonas de peligro al ataque de la langosta centroamericana (*Schistocerca piceifrons piceifrons Walker*) apoyados en sensores de alta resolución y SIG. Estudio de caso la Huasteca Potosina-México. Conceptos de geomática y estudios de caso en México. Compilado por Raul Aguirre Gomez UNAM-Ig. Serie libros de investigación No. 5, México D.F.
- Galvao, L.S., A.R. Formaggio & D.A. Tisot.** 2006. The influence of spectral resolution on discriminating Brazilian sugarcane varieties *International Journal of Remote Sensing*. 27(4): 769–777.
- Galvão, L.S., A.R. Formaggio, D.A. Tisot.** 2005. Discrimination of sugarcane varieties in Southeastern Brazil with EO-1 Hyperion data. *Remote Sens. Environ.* 94: 523-534.
- García-Mora, T.J.** 2006. Comparación de metodologías para el mapeo de la cobertura y uso del suelo en el sureste de México. *Investigaciones Geográficas*, Boletín del Instituto de Geografía UNAM 67 pp. 7-19.
- Gers, C. & E. Schmidt.** 2001. Using SPOT4 satellite imagery to monitor area harvested by small scale sugarcane farmers at Umfolozi. 75th South African Sugar Technologists Association (SASTA) pp. 28–33.
- Gonçalves, R.R.V.** 2008. Relação entre a resposta espectral da cana-de-açúcar, registrada nas imagens dos satélites AVHRR/NOAA, em São Paulo, e dados agroclimáticos, no período de 2001 a 2008. 185 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola. Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- Huang, W., H. Ming-Huang, Y. Zhi-Wei, C. Jane-Chang, T. Yang-Zenq, C. Shin-Shinge Y. Chi-Ming.** 2005. Mimicking Satellite Remote Sensing of Chlorophyll Content in Sugarcane (*Saccharum officinarum*) Leaves, *Crop, Environment & Bioinformatics* 2: 137-147.
- Jensen, J.R.** 2005. Remote Sensing Agricultural Crop Type for Sustainable Development in South Africa. *Geocarto International*, 21(2): 5-18.
- Ji-hua, M. & W. Bing-Fang.** 2008. Study on the crop condition monitoring methods with remote sensing. [http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/8\\_pdf/10\\_WG-VIII-10/05.pdf](http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/8_pdf/10_WG-VIII-10/05.pdf). Último acceso: diciembre 2012.
- Johnson, A.K.L. & A.E. Kindsey-Anderson.** 1997. Satellite-based remote sensing for monitoring land use in the sugar industry. *Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technology*, 19 pp. 237-245.
- Johnson, R.M, R.P. Viator, J.C. Veremis, P. Richard, V. Zimba.** 2008. Discrimination of sugarcane varieties with pigment profiles and high resolution, hyperspectral leaf reflectance data. *Journal Association Sugar Cane Technologists*: 63-75.
- Kridsakron, A., K. Deeudomchan, A. Prakobya.** 2008. Analysis of Economic Crop Reflectance by Field Spectral Signature: Case Study Sugarcane. Disponible en:<http://www.a-a-r-s.org/acrs/proceeding/ACRS2008/Papers/TS%2013.6.pdf>. Último acceso: diciembre 2012.
- Krishna-Rao, P.V., I. Venkateswara, V. Venkateswara - Rao.** 1999. Remote sensing approach for acreage estimation of sugarcane crop in part of Kirishna district Andhra Pradesh. *Proc STAI* 61: 79-87.
- Kuang Ning, S., Ni-Bin Chang, Kai-Yu Jeng, Yi-Hsing Tseng.** 2006. Soil erosion and non-point source pollution impacts assessment with the aid of multi-temporal remote sensing images *Journal of Environmental Management* 79: 88–101.
- Lau-Quan, A.** 2005. Estimación de la salinidad de los suelos utilizando una imagen espectrozonar y el sistema de información geográfica telemap. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 14(1): 47-54.
- Lebourgeois, V.; A. Begue, P. Degenne, E. Bappel.** 2007. Improving sugarcane harvest and planting monitoring for smallholders with geospatial technology: The Reunion Island experience. *International Sugar Journal* 109: 109-117.
- Lisson, S.N., N.G. Inman-Bamber & B.A. Keating.** 2005. The historical and future contribution of crop physiology and modelling research to sugarcane production systems. *Field Crops Research* 92: 321-335.
- Lu, D. & Q. Weng.** 2007. A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance. *International Journal of Remote Sensing* 28(5): 823–870.
- Lucas, A.A. & C.A. Shuler.** 2007. Analise do NDVI/NOAA em cana de acucar e Mata Atlantica no litoral norte de Pernambuco, Brasil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 11(6): 607-614.
- Machado, H. R.** 2007. Development of methodology to sampling in sugarcane considering biomass spectral response in orbital images. *Revista Brasileira de Cartografia*. 59(02): 115-126.
- Markham, B.L. & J.R.C. Townshend.** 1981. Land Cover Classification Accuracy as a Function of Sensor /Spatial Resolution. *Proceedings of the 15th International Symposium on remote Sensing of Environment*, Ann Arbor, pp. 1075-1090.
- Maselli, F., C. Conese, L. Petkiv, R. Resti.** 1992. Inclusion of prior probabilities derived from a nonparametric process into the maximum likelihood classifier. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 58: 201-207.

- Moore, P.H.** 2009. Sugarcane Biology, Yield, and Potential for Improvement. Workshop BIOEN on Sugarcane Improvement 18 e 19 de março, São Paulo. Disponible en: [http://www.fapesp.br/pdf/bioen1803/Bioen\\_Moore.pdf](http://www.fapesp.br/pdf/bioen1803/Bioen_Moore.pdf). Último acceso: diciembre 2012.
- Murillo, S.P.J. & M.C. Osorio.** 2009. Estimación temprana de producción de caña de azúcar a partir de imágenes satelitales MODIS. Técnicaña - VIII Congreso de la Asociación Colombiana de Técnicos de la Caña de Azúcar, pp. 356-364.
- Narciso, G. & E. Schmidt.** 1999. Identification and classification of sugarcane based on satellite remote sensing. Proc S Afr Sug Technol Ass 73: 189-194.
- Pasqualini, V., C. Pergent-Martini, G. Pergent, M. Agreil, G. Skoufas, L. Scourbes, A. Tsirika.** 2005. Use of SPOT 5 for mapping seagrasses: An application to *Posidonia oceanica*. Remote Sensing of Environment 94: 39-45.
- Pathirana, S.** 1999. Distribution of errors in a classified map of satellite data. Geocarto International, 14(4): 70-81.
- Pellegrino, G.Q.** 2001. Utilização de dados espectrais do satélite NOAA14/AVHRR como fonte de dados para modelos matemáticos de estimativa da fitomassa da cana-de-açúcar. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 133pp.
- Rincón, C.A.** 2005. Evaluación agronómica de variedades de caña de azúcar con potencial forrajero. Revista Corpoica 6(2): 60-67.
- Romero, E.R.** 2009. Manual del cañero. 1era edición. Edit. Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombes (EEAOC), Tucumán, Argentina. 232 pp.
- Rudorff, B.F.T., D. Alves de Aguiar, W.F. Da Silva, L. Miura Sugawara, M. Adami, M. Alves Moreira.** 2010. Studies on the Rapid Expansion of Sugarcane for Ethanol Production in São Paulo State (Brazil) Using Landsat Data. Remote Sens. 2: 1058-1076.
- Russell, C.** 2009. Investigating the utility of SPOT 5 imagery and Artificial Neural Networks, in the identification and mapping of *Acacia mearnsii* within environments of varying complexity. MSc Thesis, University Of Kwa-Zulu Natal, School of Environmental Sciences. Disponible en: <http://researchspace.ukzn.ac.za/xmlui/handle/10413/607>
- Sirvastva, O.P, A. Kumar, Y. Nagar.** 1999. Application of satellite technology in management and planning of sugarcane cultivation in the Saraswati sugar mills, Yamuna Nagar. Proc STAI 61 pp. 145-156.
- Soria, F., C. Fandos, J. Scandaliaris, M. Morandini, D.R. Pérez.** 2007. Evaluación de los datos del sensor ASTER para estimar la superficie cultivada y los niveles de producción de caña de azúcar en Tucumán, Argentina. Rev. Ind. Agríc, Tucumán 84(1): 23-26.
- Soria, F., C. Fandos, J. Scandaliaris.** 2002. Using Landsat Data to Estimate Planted Area and Production Levels of Sugarcane in Argentina. The Earth Observer, 14 (3): 12-16.
- Soria, F.J., C.A. Ortiz-Solorio.** 2009. Sitios de ocurrencia y predicción de rendimientos de maíz a través de índices de vegetación de imágenes de satélite TERRA. Latinoamericana 18(001): 27-34.
- Straschnoy, J.V., C.M. Di Bella, F.R. Jaimes, P.A.; Oricchio, C.M. Rebella.** 2006. Caracterización espacial del estrés hídrico y de las heladas en la región pampeana a partir de información satelital y complementaria. Revista de Investigaciones Agropecuarias (RIA) 35 (2): 117-141.
- Upadhyay, G.S.** 2008. Derivation of Crop Phenological Parameters using Multi-Date SPOT-VGT-NDVI Data: A Case Study for Punjab. Indian Soc. Remote Sens. 36: 37-50.
- Vicini, L.E.** 2007. Determinación de la variación del rendimiento cultural de caña de azúcar en Tucumán-Argentina, posicionada con GPS. Proyecto Nacional Agricultura de Precisión. Ediciones INTA, Actualización Técnica No. 8, 20 p.
- Vikesh, K.V. & J. Kamal.** 2010. Development of Spectral Signatures and Classification of Sugarcane using ASTER Data. International Journal of Computer Science & Communication 1(1): 245-251.
- Waclawovsky, A.** 2010. Sugarcane for bioenergy production: an assessment of yield and regulation of sucrose content. Plant Biotechnology Journal 8: 263-276.
- Wiegand, C.** 1996. Soil salinity effects on crop growth and yield-illustration of an analysis and mapping methodology for sugarcane. J. Plant Physiol. 148: 418-424.
- Yang C. & J.H. Everitt,** 2011. Evaluating high resolution SPOT 5 satellite imagery for crop identification. Computers and Electronics in Agriculture. 75(2): 347-354
- Yang, C., J.H. Everitt, R.S. Fletcher.** 2008. Using High Resolution SPOT 5 Multispectral Imagery for Crop Identification ASABE Technical Library Online. American Society of Agricultural and Biological Engineers, St. Joseph, Michigan. Disponible en: <http://www.asabe.org>.
- Zarco-Hidalgo, A, F. Paz-Pellat, E. Palacios-Vélez.** 2008. Modelación del efecto de escala espectral en el sistema suelo-vegetación. Agrociencia 42: 193-204.
- Zossi, B.S, G.J. Cardenas, N. Sorol, M. Sastre.** 2010. Influencia de compuestos azúcares y no azúcares en la calidad industrial de caña de azúcar en Tucumán. Parte 1: caña limpia y despuntada. Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán Tomo 87 (1) pp. 15-27.