



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO EN HIDROCIENCIAS

**APLICACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE PERCEPCIÓN
REMOTA EN LA ESTIMACIÓN DE RENDIMIENTOS EN
CAÑA DE AZÚCAR**

GUILLERMO ALBERTO ZENTENO CRUZ

TESIS

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO.

2012

La presente tesis, titulada: **Aplicación de tecnologías de percepción remota en la estimación de rendimientos en caña de azúcar**, realizada por el alumno: Guillermo Alberto Zenteno Cruz, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS

HIDROCIENCIAS

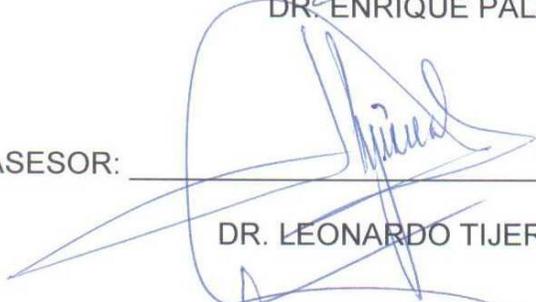
CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO:



DR. ENRIQUE PALACIOS VÉLEZ

ASESOR:



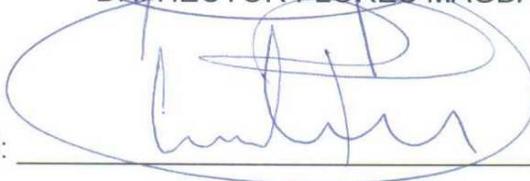
DR. LEONARDO TIJERINA CHÁVEZ

ASESOR:



DR. HECTOR FLORES MAGDALENO

ASESOR:



DR. CARLOS ALBERTO VILLASEÑOR PEREA

Montecillo, Texcoco, México, Agosto de 2012.

Aplicación de tecnologías de percepción remota en el diagnóstico y estimación de rendimientos en caña de azúcar.

Zenteno Cruz Guillermo Alberto, M.C.
Colegio de Postgraduados, 2012

RESUMEN

Los productores de caña de azúcar buscan constantemente formas de reducir costos, aumentar la productividad y los rendimientos, pero en general, son pocas las herramientas que se están aplicando para tal fin. Por otra parte, es cada vez más importante la predicción temprana del rendimiento de los cultivos que permita una planificación de políticas agrícolas y de seguridad alimentaria en una economía de mercado globalizado. Con el propósito de calibrar una metodología para enfrentar estos problemas, la presente investigación se llevó a cabo en la zona de abasto del Ingenio Emiliano Zapata, en Morelos, México, en una superficie de 10, 664 hectáreas, durante el ciclo agrícola 2009-2010. El propósito del estudio fue determinar una función matemática para estimar el rendimiento de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) con base en el análisis temporal de índices de vegetación de diferencias normalizadas (NDVI) e índices de estrés de humedad (MSI) obtenidos de imágenes Landsat-ETM+ y, estimar la evapotranspiración del cultivo (ETc), calculando la variable Kc FAO (1986), en función de índices NDVI y utilizando la evapotranspiración de referencia (ETr) obtenida de estaciones agrometeorológicas, basada en la fórmula de Penman-Monteith. De acuerdo con los resultados se concluye que el rendimiento de caña de azúcar puede ser estimado con precisión aceptable considerando los valores promedio de índices NDVI, MSI y ETc. La regresión lineal presentó un coeficiente de determinación (r^2) de 0.92, 0.77 y 0.85, respectivamente. Lo que permite conocer la efectividad de las predicciones de rendimiento realizadas en este estudio.

Palabras clave: predicción temprana, índices de vegetación, estrés hídrico, evapotranspiración, *Saccharum officinarum* L.

Application of remote sensing technologies in the estimation of sugar cane yield.

Zenteno Cruz Guillermo Alberto, M.C.
Colegio de Postgraduados, 2012

ABSTRACT

Sugarcane producers are constantly looking for ways to reduce costs and increase productivity and yields, but in general, few tools are being implemented for this purpose. Moreover, the early prediction of crop yields is increasingly important to allow for planning of agricultural policies and food security in a globalized market economy. In order to calibrate a methodology to address these problems, this research was conducted on the sugarcane supply of Ingenio Emiliano Zapata in Morelos, Mexico, in an area of 10,664 hectares during the 2009-2010 crop season. The purpose of this study was to determine a mathematical function to estimate the yield of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) based on temporal analysis of the normalized difference vegetation index (NDVI) and the moisture stress index (MSI), both obtained from Landsat-ETM+, and the estimated crop evapotranspiration (ETc) found by calculating the variable Kc FAO (1986) based on the NDVI and the reference evapotranspiration (Etr) obtained from agro-meteorological stations based on the Penman-Monteith formula. Based on the results it is concluded that the yield of sugar cane can be estimated with reasonable accuracy by considering the average values of the NDVI and MSI indices and the ETC. Linear regression showed coefficients of determination (r^2) of 0.92, 0.77 and 0.85, respectively, indicating the effectiveness of the performance predictions made in this study.

Key words: Early prediction, vegetation indices, water stress, evapotranspiration, *Saccharum officinarum* L.

Expreso mi agradecimiento:

A Dios, por su inmerecida gracia sobre mí.

A mis padres, Jorge Zenteno Aguilar y Rosario Cruz Palacios por todo su apoyo y cariño, porque a pesar de la distancia, han sabido guiarme por el buen camino.

A mis hermanos, Jorge, Cristal, Roxana, Cindy y Jacqueline por todo el tiempo robado a ustedes en la realización de mis estudios.

A la familia Cortés Hernández por su amor y consejos, que han sido de inspiración para seguir adelante.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología que ha participado en el financiamiento de mis estudios de posgrado.

Al Colegio de Postgraduados y su cuerpo académico por los conocimientos y habilidades adquiridos dentro de la formación académica.

Al Dr. Enrique Palacios Vélez por la oportunidad de participar en esta investigación, por sus valiosas contribuciones y correcciones en la revisión de este trabajo.

A los asesores del consejo particular de esta investigación, Dr. Leonardo Tijerina Chávez, Dr. Héctor Flores Magdaleno y Dr. Carlos Alberto Villaseñor Perea por el apoyo brindado y participación en la dirección de la investigación.

A los ingenieros: Roberto Guzmán, Jesús Rodríguez, Erick Taboada y Fernando Yescas, por su todo su apoyo y contribuciones a este trabajo.

A todos los familiares y amigos que me han apoyado incondicionalmente.

CONTENIDO

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 2. OBJETIVOS | 4 |
| 2.1. GENERAL..... | 4 |
| 2.2. PARTICULARES..... | 4 |
| 3. HIPÓTESIS | 4 |
| 3.1. GENERAL..... | 4 |
| 3.2. PARTICULARES..... | 4 |
| 4. REVISIÓN DE LITERATURA | 5 |
| 4.1. CARACTERIZACIÓN DEL CULTIVO DE CAÑA DE AZÚCAR..... | 5 |
| 4.2. PERCEPCIÓN REMOTA..... | 9 |
| 4.3. USO DE PRECEPCION REMOTA PARA EL MONITOREO DE CAÑA DE AZÚCAR..... | 16 |
| 4.4. CONCLUSIONES DEL MARCO TEÓRICO | 21 |
| 5. MATERIALES Y MÉTODOS | 22 |
| 5.1. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO..... | 22 |
| 5.2. MATERIALES..... | 32 |
| 5.3. MÉTODO..... | 38 |
| 6. RESULTADOS..... | 44 |
| 6.1. INFORMACIÓN DE CAMPO..... | 44 |
| 6.2. ÍNDICE DE VEGETACIÓN..... | 45 |
| 6.3. ÍNDICE DE ESTRÉS HÍDRICO..... | 48 |
| 6.4. EVAPOTRANSPIRACIÓN..... | 49 |
| 6.5. RENDIMIENTO..... | 51 |
| 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 52 |
| 7.1. CONCLUSIONES | 52 |
| 7.2. RECOMENDACIONES | 53 |
| 8. AGRADECIMIENTOS | 53 |
| 9. LITERATURA CITADA | 54 |
| 10. ANEXO | 57 |

LISTA DE CUADROS

| | | |
|-------------------|---|----|
| CUADRO 1. | BANDAS Y APLICACIONES DEL LANDSAT 7 <i>ENHANCED THEMATIC MAPPER PLUS</i> | 13 |
| CUADRO 2. | INDICADORES DE LA CONDICIÓN EDÁFICA EN EL ÁREA DE ABASTO DEL INGENIO EMILIANO ZAPATA, MORELOS. | 26 |
| CUADRO 3. | DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIA DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (CE), pH, SODIO Y CARBONATO DE CALCIO EQUIVALENTE..... | 27 |
| CUADRO 4. | CONDICIÓN NUTRIMENTAL DE ELEMENTOS SECUNDARIOS Y MENORES EN LOS SUELOS DEL ÁREA DE ABASTO DEL INGENIO EMILIANO ZAPATA, MORELOS. | 27 |
| CUADRO 5. | MÓDULOS DEL DISTRITO DE RIEGO 016 ESTADO DE MORELOS. | 30 |
| CUADRO 6. | TRANSFERENCIA DEL DISTRITO DE RIEGO 016..... | 31 |
| CUADRO 7. | IMÁGENES DE SATÉLITE LANDSAT 7ETM+ UTILIZADAS EN EL MONITOREO DEL CULTIVO DE CAÑA DE AZÚCAR. | 33 |
| CUADRO 8. | DATOS METEOROLÓGICOS OBTENIDOS DE LA ESTACIÓN INIFAP..... | 37 |
| CUADRO 9. | DESCRIPCIÓN DE LAS PARCELAS DE CONTROL..... | 42 |
| CUADRO 10. | GEOREFERENCIACIÓN DE LAS PARCELAS DE CONTROL. | 44 |
| CUADRO 11. | VALORES CALCULADOS DE ETC, NDVI Y MSI..... | 46 |
| CUADRO 12. | CÁLCULO DE Kc A PARTIR DE VALORES DE NDVI..... | 50 |

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-------------------|--|----|
| FIGURA 1. | REGIONES PRODUCTORAS DE CAÑA DE AZÚCAR (PRONAC, 2007)..... | 7 |
| FIGURA 2. | DIAGRAMA DE PRODUCTIVIDAD DE LOS ESTADOS CAÑEROS EN MÉXICO (ELABORADO CON DATOS DEL MANUAL AZUCARERO MEXICANO 2010 Y LA METODOLOGÍA DE LUNA ET AL., 1995). | 8 |
| FIGURA 3. | ESQUEMA DE ADQUISICIÓN DE INFORMACIÓN POR SENSORES REMOTOS..... | 9 |
| FIGURA 4. | ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO. | 10 |
| FIGURA 5. | ESQUEMA DE LA DISPOSICIÓN DE UNA IMAGEN DE SATÉLITE DEL LANDSAT ETM+. | 11 |
| FIGURA 6. | FIRMAS ESPECTRALES (ADAPTADO DE NOWATZKI, ET AL., 2004). | 12 |
| FIGURA 7. | ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA. | 14 |
| FIGURA 8. | LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DEL ÁREA DE ESTUDIO. | 22 |
| FIGURA 9. | DELIMITACIÓN DE LA ZONA DE ABASTO DEL INGENIO EMILIANO ZAPATA. | 23 |
| FIGURA 10. | DISTRIBUCIÓN ANUAL DE LA TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN EN LA ZONA DE ABASTO DEL INGENIO EMILIANO ZAPATA. | 25 |
| FIGURA 11. | CONDICIÓN ACTUAL DEL SUELO..... | 28 |
| FIGURA 12. | MÓDULOS DE RIEGO DEL DISTRITO DE RIEGO 016 ESTADO DE MORELOS..... | 29 |
| FIGURA 13. | IMAGEN LANDSAT CORRESPONDIENTE A LA ZONA DE ABASTO DEL INGENIO. | 32 |
| FIGURA 14. | SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DEL AREA DE ABASTO DEL INGENIO. | 35 |
| FIGURA 15. | ESTACIONES AGROCLIMÁTICAS DE MORELOS. | 35 |
| FIGURA 16. | EQUIPO DE MEDICIÓN DE ESTACIÓN AGROMETEOROLÓGICA INIFAP..... | 36 |
| FIGURA 17. | PROCESAMIENTO DE IMÁGENES LANDSAT. | 38 |
| FIGURA 18. | IMAGEN COMPUESTA EN FALSO COLOR DEL SATÉLITE LANDSAT 7 ETM+ CORRESPONDIENTE A LA ZONA DE ESTUDIO DE FECHA DICIEMBRE DE 2008..... | 39 |
| FIGURA 19. | IMAGEN COMPUESTA DE NDVI-REFLECTANCIA LANDSAT 7 (21-10-08). | 40 |
| FIGURA 20. | IMAGEN COMPUESTA DE MSI-REFLECTANCIA LANDSAT 7 (21-10-08). | 40 |
| FIGURA 21. | LOCALIZACIÓN DE LOS PUNTOS DE CONTROL EN LA ZONA DE ABASTO DEL INGENIO EMILIANO ZAPATA. | 45 |
| FIGURA 22. | VARIACIÓN DE VALORES DE NDVI EN PARCELAS DE LA ZONA DE ESTUDIO. | 47 |
| FIGURA 23. | REGRESIÓN DE LAS VARIABLES RENDIMIENTO Y NDVI | 47 |
| FIGURA 24. | VARIACIÓN DE VALORES DE MSI EN PARCELAS DE LA ZONA DE ESTUDIO..... | 48 |
| FIGURA 25. | REGRESIÓN DE LAS VARIABLES RENDIMIENTO Y MSI..... | 49 |
| FIGURA 26. | REGRESIÓN DE LAS VARIABLES RENDIMIENTO Y ETC. | 50 |

1. INTRODUCCIÓN

La caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) es una planta perenne en forma de tallo que es cultivada en las regiones tropicales y subtropicales del mundo (actualmente se cultiva en 105 países) entre las latitudes 37° N y 31° S, principalmente, por su capacidad para almacenar grandes cantidades de sacarosa (10-18%) en los internudos, dependiendo de la variedad y de las condiciones agroclimáticas como factores limitantes para su crecimiento, además de la etapa de desarrollo (planta, soca o resoca), suelo, fertilización, clima, temperatura, plagas, malezas, enfermedades y la disponibilidad de agua, tienen relación directa en la productividad del cultivo (rendimiento de campo y agroindustrial) (Abdel-Rahman, 2008; Inman-Bamber, 2005).

La agroindustria de la caña de azúcar en México, por tradición, es un sector productivo en continua crisis económica, tecnológica, ambiental y social, funcionando sobre la base de subsidios estatales al comercializar un solo producto (la sacarosa o azúcar de mesa) como resultado de operaciones unitarias de proceso en una factoría denominada “Ingenio Azucarero” que procesa una única materia prima (caña de azúcar) procedente de un monocultivo. Por otra parte, se tiene como sector productivo alternativo, la producción de panela o piloncillo y/o pilón en una instalación denominada “Trapiche”.

La producción de azúcar depende de la cantidad de materia prima disponible que, a su vez, está limitada por el área sembrada, la productividad agrícola, y el total de azúcar recuperable. De estos tres factores, la más compleja es la productividad de la cultura de la caña de azúcar, porque depende de una serie de factores relacionados con aspectos agronómicos y meteorológicos.

Los productores de caña de azúcar de ambos sistemas productivos, continúan buscando formas de reducir costos, aumentar la productividad y los rendimientos, pero en general, son pocas las herramientas que se están aplicando para este fin.

Actualmente, la evaluación del potencial productivo de la caña de azúcar es llevado a cabo, generalmente, al finalizar cada zafra anterior a la cosecha, basándose en la experiencia de técnicos —a través de observaciones de campo y muestreos utilizando datos estadísticos de años anteriores— sin considerar la distribución espacial del área plantada y su variabilidad a diversos factores ambientales, lo que trae como consecuencia errores en los estimados de producción, principalmente en zonas agrícolas de gran heterogeneidad.

En este sentido, el primer paso en la estimación, optimización de la producción, el transporte, y el uso de los recursos de la biomasa cañera es la comprensión del potencial de las tierras agrícolas para producir caña de azúcar. Sin embargo, las mediciones sobre el terreno no se pueden hacer con detalle suficiente para la distribución espacial, prefiriéndose realizar estimados de producción mediante análisis estadístico (Elmorea et al., 2008; Krishna Rao, 2002; Fortes, 2003).

Los recientes avances en monitoreo de culturas agrícolas y Agricultura de Precisión (AP) de la producción primaria y la cartografía de la cubierta terrestre pueden hacer posible el monitoreo y la estimación precisa del estado del cultivo de caña de azúcar en una región determinada a escala predio o unidad productiva, debido a la longevidad del cultivo, el bajo costo adquisición de imágenes, su cobertura espacial y la posibilidad de generar los índices de sus bandas espectrales (Zhang y Anderson, 2005).

Ante esta situación, las técnicas de Percepción Remota (PR) en especial los sistemas LANDSAT, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y los sistemas de geoposicionamiento (GPS) son herramientas útiles en la identificación y monitoreo de grandes áreas agrícolas, estimación de la producción, detección de enfermedades y estrés, a través del análisis de la distribución espacial, el mapeo de las diversas zonas productivas, direccionamiento del muestreo y observación en campo, promoviendo una mayor evaluación del potencial productivo de las áreas sembradas dentro de la Agricultura de Precisión (AP) o de Sitio Específico, basada en la variabilidad espacial del suelo y parámetros de campo de los cultivos (Ueno et al., 2005; Soria, 2004; Rudorff, 1990; Epiphonio, 1996).

Esto se debe, según Begue (2008) y Ji-hua 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 ser dependientes o independientes del tiempo. Los primeros, están relacionados directamente con el sustrato: topografía, tipo, profundidad y uso del suelo. Factores anuales como: anomalías en la plantación y emergencia o condiciones climáticas; y estacionales, como enfermedades, malezas, sequía, inundaciones o heladas. Ambos factores pueden, a su vez, interactuar generando un patrón espacio-temporal complejo que explique el diagnóstico del vigor del cultivo y productividad de la planta de caña de azúcar bajo un particular escenario ambiental.

En este sentido, los SIG brindan la posibilidad de vincular espacialmente distintas fuentes de información, y a partir del análisis de las imágenes generadas por sensores remotos, es posible obtener información de las características de las coberturas vegetales, utilizando diferentes técnicas de procesamiento de imágenes; entre ellas, el cálculo de índices de vegetación a partir de los valores de reflectividad a distintas longitudes de onda y pretende extraer la información relacionada con la vegetación, minimizando la influencia de otros factores externos en la toma de decisiones (Hatfield, 2008).

Por lo tanto, la percepción remota presenta una visión sinóptica de las zonas agrícolas y posibilita un seguimiento temporal de las fases de desarrollo en grandes áreas agrícolas con un gran potencial para su uso en el cultivo de caña de azúcar, especialmente en los procesos relacionados con la clasificación y mapeo de caña de azúcar, identificación varietal y la estimación de rendimientos de producción (Simões Dos Santos, 2003; 2005).

Es así que se han desarrollado diversas metodologías para estimar el estrés hídrico y la uniformidad del riego con el uso de imágenes de satélite, como son el índice de estrés de humedad (MSI) y para el rendimiento el Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas (NDVI), que a nivel experimental presentan resultados significativos, que permitirán conocer una estimación temprana del rendimiento y la producción. Por lo anterior, es importante calibrar una metodología para el cultivo de la caña de azúcar, con precisión y costo aceptable, aspectos que son objetivo del presente estudio.

2. OBJETIVOS

2.1. GENERAL.

Calibrar una metodología para medir variables fisiológicas del cultivo de caña de azúcar, tales como el índice de vegetación (NDVI) y el índice de estrés de humedad (MSI) para predecir el rendimiento usando técnicas de análisis de información del satélite Landsat 7 ETM+ en el cultivo de caña de azúcar.

2.2. PARTICULARES.

- Caracterizar la variación espacial del rendimiento del cultivo de caña de azúcar a través del Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas (NDVI), en la zona de abastecimiento del Ingenio Emiliano Zapata.
- Caracterizar la variación espacial del estrés hídrico y la uniformidad del riego a través del Índice de estrés de humedad (MSI) en la zona de abastecimiento del Ingenio Emiliano Zapata.

3. HIPÓTESIS

3.1. GENERAL.

Para lograr estimar el rendimiento de los cultivos con anticipación a la cosecha, se pueden hacer inferencias mediante la medición de variables fisiológicas del cultivo, de clima y de sitio, con sensores remotos.

3.2. PARTICULARES.

- El Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas (NDVI) permite conocer una estimación temprana del rendimiento del cultivo de caña de azúcar.
- La calidad de la información contenida en las imágenes de satélite Landsat 7 ETM+ es adecuada para estimar el índice de estrés de humedad (MSI) al que está sujeto el cultivo de caña de azúcar; así como para caracterizar su variación espacial en la zona de abastecimiento del Ingenio Emiliano Zapata.

4. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1. CARACTERIZACIÓN DEL CULTIVO DE CAÑA DE AZÚCAR.

4.1.1. Generalidades sobre el cultivo

La caña de azúcar (*Saccharum* spp. Híbrido) es una planta perenne de alto crecimiento que se cultiva en las regiones tropicales y subtropicales del mundo, entre las latitudes 37° N y 31° S, principalmente por su capacidad de almacenar altas concentraciones de sacarosa en los entrenudos (Grof y Campbell, 2001). La caña de azúcar tiene un contenido de sacarosa de 10 a 18% y un contenido de fibra de 10-15% en la cosecha. Los tallos están listos para la cosecha de 10 a 24 meses más tarde. Se trata esencialmente de una planta del trópico cálido que presenta mejor crecimiento cuando se entremezclan lluvias frecuentes con un sol brillante. Es muy sensible a la temperatura: por debajo de 15 °C el crecimiento es muy lento, mismo que cesa cuando la temperatura supera los 35 °C. El rango de temperatura óptima para el crecimiento de la caña de azúcar es de 20-30 °C. Hay muchos factores que afectan la producción de caña de azúcar como la elección de la variedad, las condiciones climáticas y del suelo, y la disponibilidad de agua (Inman-Bamber y Smith, 2005).

El agua es un elemento vital en el desarrollo de las plantas. Específicamente en el caso de la caña, este elemento constituye entre el 70 y el 75% del peso de la planta madura. S.F. Shih y G.J. Gascho (1980) reportan que para producir un kg de caña se requieren 89 kg de agua en el caso de la planta y 118 kg de agua en la soca. Para producir un kg de azúcar se requieren 884 kg de agua en caña planta y 1115 kg en soca.

Aunque la caña se cultiva principalmente como una fuente de azúcar, y más de la mitad del suministro mundial de azúcar se obtiene de dicho cultivo, varios subproductos son producidos a partir de trituración de la caña en los ingenios azucareros. Estos incluyen bagazo, melaza, torta de la fibra, y la cera de la caña (OGTR, 2004). Sin embargo, algunos países como Brasil dan uso del cultivo, básicamente para la producción de alcohol como combustible (Xavier et al., 2006).

La caña de azúcar es un componente importante de la economía en muchos países. Muchos de estos son países en desarrollo, donde el azúcar contribuye sustancialmente a la economía (Graham et al., 2005). La cosecha da empleo no sólo a los trabajadores agrícolas en el campo, sino también a los trabajadores industriales en las fábricas de azúcar. La caña de azúcar se cultiva en 107 países, y los mayores productores son Brasil, India y China, que representan más del 50% de la producción mundial (Alvarez y Polopolus, 2002).

4.1.2. Diagnóstico de las regiones cañeras en México

En México, el cultivo de caña de azúcar se sitúa entre los 37° de latitud norte y los 31° de latitud sur. Se encuentra en las costas del Océano Pacífico y del Golfo de México, y comprende una faja transversal sobre el paralelo de los 19° de latitud norte.

La caña se produce en diversos, climas, suelos y condiciones culturales en 6 regiones en 15 entidades federativas del país (Figura 1); dentro de los cuales destacan por su alto rendimiento promedio anual, Puebla, Morelos y Chiapas, con valores de 112.3, 103.7 y 98.2 tn ha⁻¹, además de Veracruz, San Luis Potosí y Jalisco; estados que destacan por su alta superficie cultivable, correspondiente a 245 474, 68 744 y 58 029 ha, siendo Veracruz el principal productor con un promedio de 18.2 millones de toneladas (SIAP, 2008).

El cultivo se desarrolla en un amplio margen de condiciones de humedad, se encuentran zonas con precipitación pluvial de 10 000 mm anuales hasta zonas que experimentan extrema sequía, nortes en la costa del Golfo de México, así como huracanes y ciclones que hacen acto de presencia en las ambas costas del país. Climatológicamente las temperaturas en los ámbitos cañeros se definen como cálidas, semicálidas y templado – cálidas.

Las zonas cañeras se encuentran en cuatro unidades de suelos predominantes según la clasificación de FAO – UNESCO: Cambisol (55%), Vertisol (15%), Fluvisol (15%) y Luvisol (15%). En términos generales son suelos con pH ácidos o ligeramente ácidos, con bajo contenido de materia orgánica y fertilidad. Generalmente el drenaje superficial es bueno pero en el trópico húmedo se presentan problemas de inundaciones.



Figura 1. Regiones productoras de caña de azúcar (PRONAC, 2007).

Hasta el 2001, México se ubicó a nivel mundial entre los primeros 15 países productores de este cultivo y dentro de los primeros cinco países de América Latina, con un rendimiento promedio anual de 78.6 tn ha⁻¹, el cual disminuyó para la zafra 2001-2002 a 70.7 tn ha⁻¹, para este mismo ciclo se reportaron valores máximos y mínimos de 112.3 tn ha⁻¹ (Ingenio Calipán, Puebla) y 39.7 tn ha⁻¹ (Ingenio La Joya, Campeche (INEGI, 2003).

La producción de caña representa una actividad de alto impacto en 227 municipios donde habitan 12 millones personas, dicha actividad se realiza en 664 mil hectáreas que abastecen a 57 ingenios donde se procesa un promedio anual de 47.3 millones de toneladas de caña, mismos en los que se tiene la necesidad de incrementar el rendimiento del cultivo, ya que, en México, estos ingenios azucareros se clasifican como medianamente productivos y sólo con la introducción de procesos más eficientes para mejorar la productividad y la calidad del producto primario —junto con la reducción de los costos de producción— la industria azucarera del país podrá operar en mercados cada vez más competitivos.

La figura 2 muestra la baja productividad de los Ingenios mexicanos, así lo señalan los indicadores del sector azucarero.

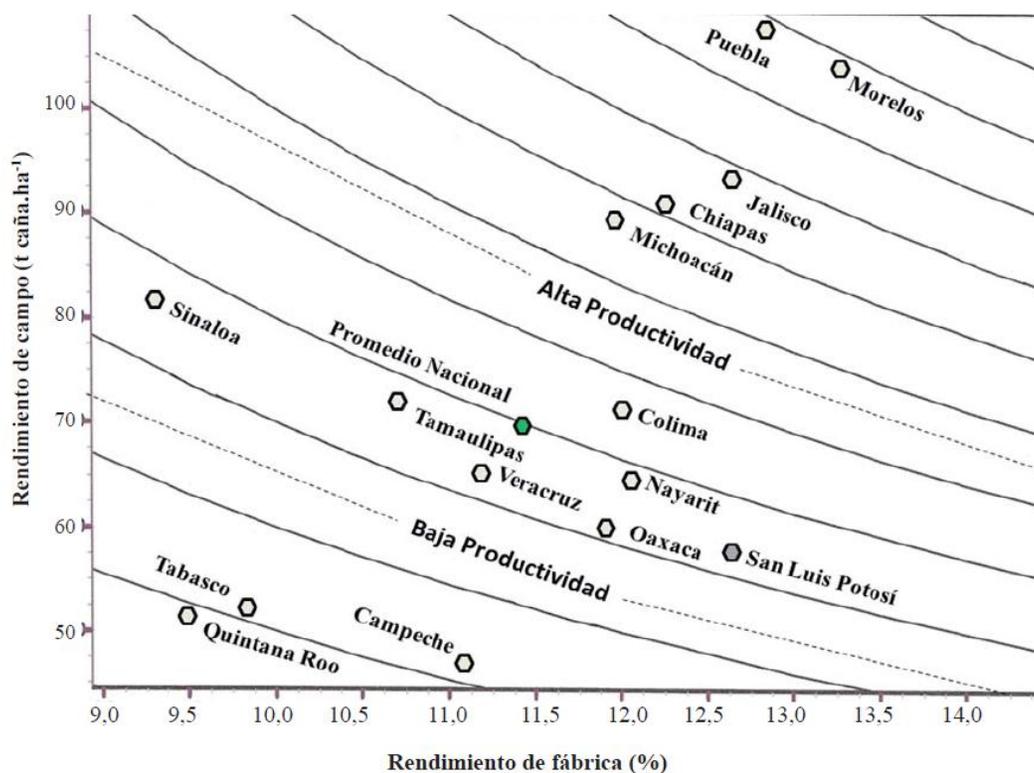


Figura 2. Diagrama de productividad de los estados cañeros en México (elaborado con datos del Manual Azucarero Mexicano 2010 y la Metodología de Luna et al., 1995).

Cabe mencionar que, en todas las regiones cañeras de México, el sector primario de la industria azucarera se caracteriza por ser la base material de la producción; ésta se evalúa en términos de superficie, tonelaje y costos. Sin embargo, ante los bajos indicadores de producción y rentabilidad de las zonas cañeras a nivel nacional, afectando esto negativamente los ingresos de los productores, se requiere analizar los factores limitantes y los geoeconómicos del cultivo, mediante metodologías que permitan establecer la relación a nivel espacial y temporal entre las variables que caractericen los niveles de productividad.

4.2. PERCEPCIÓN REMOTA.

Schowengerdt (1997), define la percepción remota como la medición de las propiedades de los objetos de la superficie terrestre usando datos adquiridos desde aviones o satélites. Es medir algo a distancia, con resultados iguales, como si la medición se hiciera "in situ".

Una de las formas en que se desarrolla la percepción remota es aquella donde se utilizan sensores remotos para capturar la información correspondiente a la interacción entre el flujo energético proveniente del sol y la superficie de la tierra que lo recibe. Dichos sensores se encuentra montados en satélites espaciales. La información que captan estos sensores es enviada del satélite a estaciones de recepción en la tierra, la cual es guardada en un formato específico en diferentes medios de almacenamiento (Soria et al., 1998).

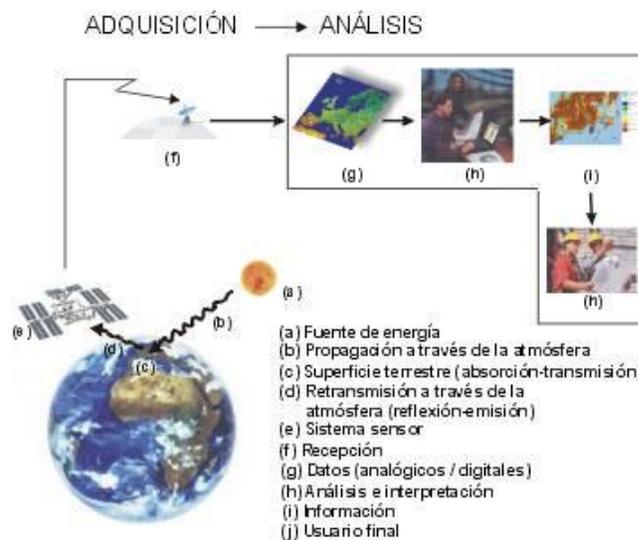


Figura 3. Esquema de adquisición de información por sensores remotos.

Los elementos básicos de un sistema de percepción remota son: fuente de energía, puede ser la energía emitida por el sol (teledetección pasiva) o emitida por el mismo sensor (teledetección activa); cubierta terrestre, y sus componentes como la atmósfera; sistema sensor, compuesto por un sensor y la plataforma que lo sustenta; sistema de recepción y comercialización, recibe la información, la graba en formato apropiado y luego la distribuye; interprete, analiza en forma visual y digital, y convierte en clave temática o cuantitativa; y usuario final, que analiza el documento fruto y toma las decisiones.

4.2.1. Espectro electromagnético

El flujo de energía constituye una radiación electromagnética, que es un haz ondulatorio y una sucesión de unidades discretas de energía o fotones con una masa igual a cero. El modelo ondulatorio explica que la energía ondulatoria tiene como características, la longitud de onda (λ) y frecuencia (f), cuyo producto constituye la velocidad de la luz. Por otra parte la energía de un fotón es también la frecuencia (f) multiplicado por la constante de Planck (k). Por lo que ambos están relacionados, a menor frecuencia el contenido energético es menor, y que son difíciles de captar.

Se ha establecido una serie de bandas con similares características, que es el espectro electromagnético, de los cuales se utilizan en la percepción remota los siguientes: Espectro visible (0.40 a 0.70 μm), infrarrojo cercano (0.70 a 0.13 μm), infrarrojo medio (1.80 a 8.00 μm), infrarrojo lejano (8.00 a 14.00 μm) y microondas (a partir de 1 mm) (Chuvienco, 1990).

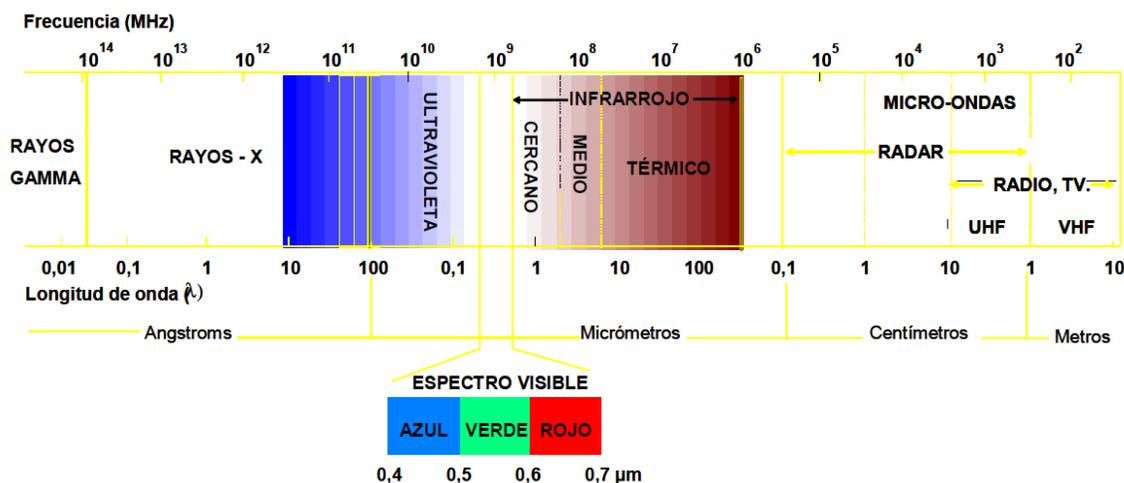


Figura 4. Espectro electromagnético.

4.2.2. Imágenes de satélite

El sensor de un satélite explora secuencialmente la superficie terrestre adquiriendo a intervalos regulares la radiación que proviene de los objetos sobre ella situados. La cadencia con la que el sensor realiza el muestreo de la superficie terrestre define la resolución espacial, que es la unidad visual más pequeña que aparece en una imagen; toda la gama de reflectancias de esta unidad de superficie terrestre, el sensor lo promedia y traduce en un valor numérico, a partir del cual se hace un tratamiento digital de imágenes. En consecuencia, cada píxel está definido por un número, traducción de la radiancia recibida por el sensor para una determinada unidad de área de la superficie terrestre y en una banda específica del espectro, que se llama Nivel Digital. (Chuvieco, 1990).

Chuvieco (1990), esquematiza una imagen digital como una matriz numérica de tres dimensiones, las dos primeras corresponden a las coordenadas geográficas de la imagen, mientras la tercera indica su dimensión espectral.

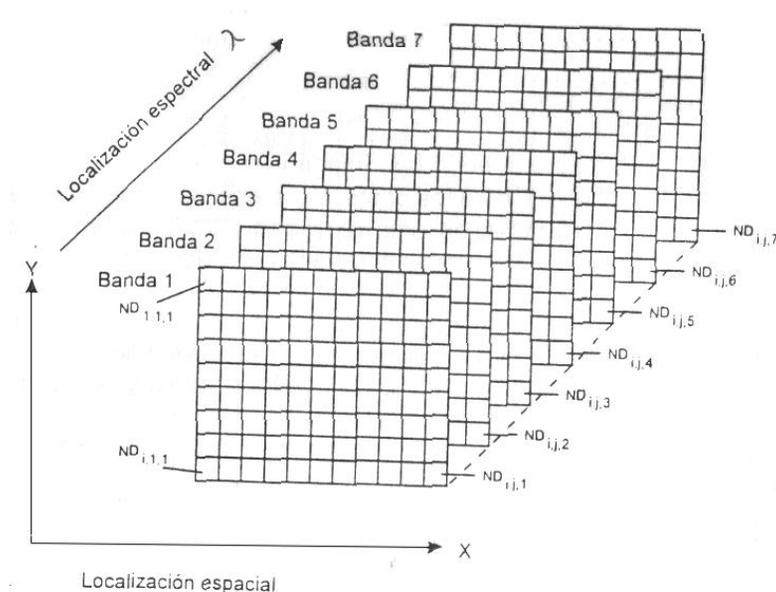


Figura 5. Esquema de la disposición de una imagen de satélite del Landsat ETM+.

Cada objeto o material en particular en la superficie de la tierra genera una distribución específica de radiación reflejada, emitida y absorbida, generando un patrón único tan exclusivo como la huella digital o firma, que se denomina firma espectral (Nolasco, 1991; citado por Soria et. al., 1998). Las firmas espectrales pueden caracterizar un cultivo de acuerdo principalmente, a sus propiedades ópticas y condiciones de manejo (Narciso et al., 1999), pero en general, todos los organismos vegetales siguen un patrón determinado, tal y como se presenta en la siguiente figura:

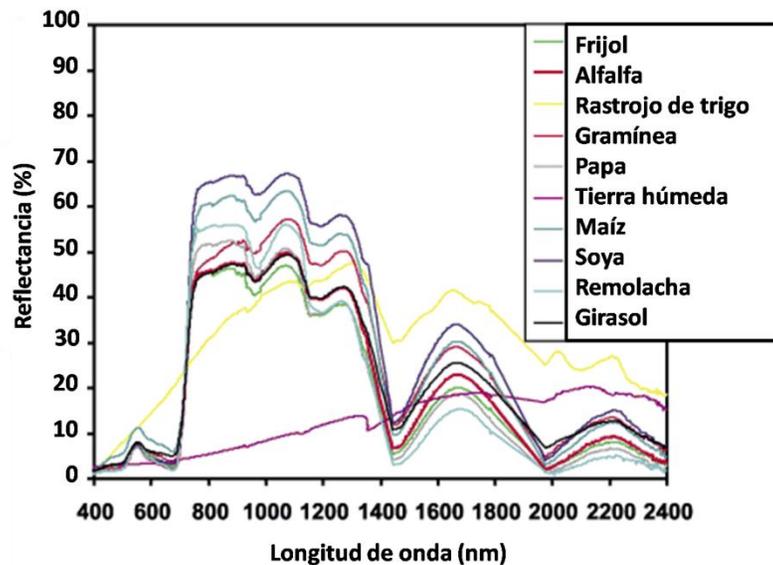


Figura 6. Firmas espectrales (Adaptado de Nowatzki, et al., 2004).

Los sistemas comerciales más utilizados en el estudio de la agricultura son el Landsat 7 ETM+, el EOS-MODIS, ASTER, SPOT y NOAA-A VHRR. El primero fue lanzado en abril 1999, utiliza el sensor mapeador temático mejorado más (ETM+), que recoge información en una órbita polar a 705 m de altitud con sincronía solar en una inclinación de 98,2°, proyecta información de la superficie de la tierra cada 16 días, en un ancho instantáneo de 183 km x 170 km. Cubre la superficie de la tierra en 233 órbitas, con traslape lateral de 7 a 84 %, incrementándose del Ecuador al Polo. La exploración de la superficie, se pasa por filtros espectrales que distinguen 8 bandas espectrales. La resolución espacial es de 30 m para cada una de las seis bandas visibles, infrarrojo cercano e infrarrojo de onda corta (bandas 1, 2, 3, 4, 5 Y 7), de 60 m para la banda infrarrojo termal (banda 6) y de 15 m para la banda pancromática (banda 8).

Cuadro 1. Bandas y aplicaciones del LANDSAT 7 *Enhanced Thematic Mapper Plus*.

| Banda | Rango espectral (μm) | Resolución (m) | Características /Aplicaciones |
|--------------|---|---------------------------|---|
| ETM1 | 0.45-0.52 Visible azul- verde | 30 | Batimetría en aguas de mayor turbidez, diferencias suelo/vegetación, deciduas/coníferas, tipos de suelo. |
| ETM2 | 0.53-0.61 Visible verde | 30 | Indicador de tasa de crecimiento/vigor de vegetación, estimación de sedimentación, batimetría de agua turbia. |
| ETM3 | 0.63-0.69 Visible rojo | 30 | Absorción de clorofila/diferenciación de especies, clasificación de copas, cobertura de vegetación y densidad, aplicaciones geológicas. |
| ETM4 | 0.78-0.90 Infrarrojo solar cercano | 30 | Delineación de cuerpos de agua, variaciones de biomasa y estrés. |
| ETM5 | 1.55-1.75 Infrarrojo solar medio | 30 | Humedad de vegetación/estrés, estudio de minerales. |
| ETM6 | 10.4-12.5 Infrarrojo térmico emitido (bandas H y L) | 60 | Temperatura de superficie aparente, separación urbana versus uso de la tierra; distinción de áreas quemadas con respecto a los cuerpos de agua. |
| ETM7 | 2.09-2.35 Infrarrojo solar | 30 | Zonas hidrotermalmente alteradas, exploración minera, discriminación de tipos de suelo. |
| ETM8 | 0.52 - 0.90 Pancromático | 15 | |

Fuente: Newsletter (1986), citado por Ponce (1998).

Las observaciones desde el espacio proporcionan cobertura global y sinóptica, e información de zonas remotas y de difícil acceso; presentan frecuencia temporal y actualización de datos con alta repetitividad permitiendo el estudio de fenómenos dinámicos y la actualización continua de la cartografía existente; la homogeneidad de los datos es de gran valor en la cartografía y en estudio de evolución de fenómenos; su formato digital permite su integración en los sistemas de información geográfica (SIG) (Chuvieco, 2002; Pinilla, 1995; Sobrino, 2000).

4.2.3. Sistemas de información geográfica (SIG)

Los SIG's se definen como un conjunto de hardware, software, personas y procedimientos diseñados para soportar la captura, el manejo, la manipulación, el análisis, el modelaje y el despliegue de datos estadísticos, espaciales y temporales para la solución de problemas complejos del manejo y uso de la tierra. El objetivo principal de un SIG es obtener resultados confiables para la toma de decisiones, a través del análisis e interpretación de gran cantidad de datos biofísicos, socioeconómicos, estadísticos en forma espacial y temporal, necesarios para generar de una forma flexible productos de información tales como tablas y mapas (FAO, 1997; Fernández y Sumano, 1992 y Nozica et al., 1997).



Figura 7. Elementos de un Sistema de Información Geográfica.

Los modelos de datos que procesa el SIG son: Celdas (matriz o RASTER) y Vectores; el primero, divide el área de estudio en una malla, existe mayor información en los datos, en el modelo de vectores, utiliza puntos y segmentos de líneas separadas o conectadas entre sí. El SIG permite conversión entre ambos modelos (Chuvienco, 1990). Para el tratamiento digital y visual se cuenta principalmente con las plataformas Idrisi, FreeLook y ArcView.

En este sentido, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) brindan la posibilidad de vincular espacialmente distintas fuentes de información, y a partir del análisis de las imágenes generadas por sensores remotos, es posible obtener información de las características de las coberturas vegetales (Hatfield, 2008).

4.2.4. Tratamiento y transformación de imágenes

El procesamiento de estas imágenes puede ser de tipo visual y digital. En el análisis visual, se debe considerar el tono, color, textura, situación espacial, periodo de adquisición y otros, sus aplicaciones son exclusivas, de cartografía geológica, cobertura del suelo, morfología urbana, etc. Digital, consiste en procesar valores numéricos, radiación que se refleja en mayor cantidad de un terreno equivale a un píxel, valor que traduce el sensor a un valor numérico entero llamado número o nivel digital.

En el procesamiento digital se transforman los valores de radiancia a reflectancia aparente con el fin de expresar los resultados en valores físicos. Estos cálculos permiten transformar los valores originales de cada imagen en parámetros físicos, permitiendo así que sean comparables en el tiempo, aún bajo condiciones atmosféricas diferentes (Chuvienco, 1996).

Una vez que se tiene una matriz tridimensional, de coordenadas geográficas y dimensión espectral, que puede ser procesada como una matriz cualquiera para el fin dado, se pueden realizar correcciones geográficas y atmosféricas, y de forma, como el realce y transformaciones (índice de vegetación y análisis de componentes principales) y la clasificación digital (cuyo resultado son cartográficos y estadísticos) y presentación de resultados (Chuvienco, 1990).

El procesamiento digital de imágenes de satélite está ampliamente relacionado con la Corrección geométrica, realces, clasificación y transformación. Por otro lado, el análisis espacial, espectral, temporal y radiométrico de una firma espectral pueden ser empleados para ubicar sitios de ocurrencia de un cultivo, cuantificar la superficie y predecir la producción agrícola (Soria, 1999).

4.3. USO DE PRECEPCION REMOTA PARA EL MONITOREO DE CAÑA DE AZÚCAR

Las aplicaciones de las técnicas de percepción remota en el cultivo de caña de azúcar se han llevado a cabo con especial énfasis en la clasificación del cultivo, discriminación de las variedades y predicción del rendimiento. Se puede concluir que al seleccionar la resolución espacial y espectral, así como técnicas adecuadas de tratamiento para la extracción de información espectral de caña de azúcar, debe encontrar su uso con resultados satisfactorios. Este es el principio de la percepción remota (Campbell, 1996).

4.3.1. Clasificación de caña de azúcar y mapeo de área sembrada

La estructura de las industrias azucareras de países como Australia, Sudáfrica, India, Brasil y México (con un alto número de productores) ha requerido de herramientas como los sensores remotos para la obtención de información acerca de la localización y extensión de áreas cultivadas con caña de azúcar. Métodos tradicionales como fotografía aérea y levantamientos en campo han requerido de mucha inversión en tiempo y costos, por lo cual la alternativa de los sensores remotos ha resultado viable (Johnson et al., 1997).

Estudios realizados en Australia por Lee-Lovick et al. (1991), citado por Abdel-Rahman et al. (2008), demostraron que el uso de sensores como el Landsat TM para la identificación de caña de azúcar proporcionaba resultados consistentes. En Brasil, Tardin et al. (1992), citado por Abdel-Rahman et al. (2008), fue capaz de discriminar caña de azúcar de café y cítricos con una precisión mayor al 95 por ciento utilizando Landsat TM.

De la misma manera, Narciso et al. (1999) utilizó el mismo sensor para identificar y clasificar caña de azúcar en Sudáfrica. Sus resultados difirieron entre el 5 y 10 por ciento con la información proporcionada por productores de 46 fincas, mientras que los resultados obtenidos para el área total de estudio (10,479 ha) difirieron en menos del 5 por ciento.

También, se puede mencionar el estudio de detección y cuantificación de caña de azúcar en el estado de Morelos, en el que se pudo localizar e identificar lotes de caña a punto de corte, debido a lo característico de su respuesta espectral. Al mismo tiempo, fue posible identificar campos que ya habían sido cosechados, así como reconocer diferentes etapas de desarrollo del cultivo (INEGI, 1985).

La precisión en los resultados obtenidos en los estudios anteriores se debe principalmente, a la alta resolución espacial de los productos utilizados. La resolución espacial de los sensores proporciona una mayor información que permite discriminar de mejor manera la caña de azúcar de otros usos del suelo. Esto fue evidenciado por Xavier et al. (2006), quien clasificó caña de azúcar de Brasil a partir del sensor de moderada resolución espacial MODIS (250 m). Los resultados mostraron la alta capacidad de MODIS para discriminar caña de azúcar de cuerpos de agua, bosques, soya, maní y áreas urbanas. Sin embargo, no fue posible diferenciar caña de azúcar de pastizales, los cuales tienen un comportamiento temporal y espectral muy similar.

Gers (2003), concluye en sus estudios conducidos en Sudáfrica que, si bien las herramientas de sensores remotos no reemplazarán los métodos tradicionales de monitoreo de caña de azúcar en el futuro próximo, facilitarán la identificación de áreas nuevas de producción o expansión de pequeños productores.

4.3.2. Estimación de producción

Dentro de las agroindustrias azucareras del mundo, una de las aplicaciones de sensores remotos en caña de azúcar que despierta mayor interés es la estimación de producción. El primer estudio en caña del que se tiene conocimiento fue realizado en Brasil por Rudorff et al. (1990). Los autores utilizaron un modelo basado en el índice de vegetación RVI1 derivado de imágenes de Landsat MSS (60 m), que integraron a un modelo agrometeorológico para estimar producción. Los resultados del modelo integrado

¹ Ratio Vegetation Index (Índice de vegetación de cociente)

explicaron un 69 por ciento de la variabilidad de los datos al compararse con datos reales de producción, superando el 54 por ciento del modelo basado en el RVI y el 37 por ciento del modelo agrometeorológico. Los errores estándar del modelo integrado fueron menores comparados a los errores estándar del modelo del RVI y del modelo agrometeorológico para estimar producción.

Otro estudio realizado por Schmidt et al. (2000) usando imágenes de baja resolución del sensor AVHRR (1.1 km), demostró que la resolución espacial de las imágenes tiene gran influencia sobre los resultados en las estimaciones de producción. Al utilizar el NDVI para estimar producción, los resultados explicaron solamente un 46 por ciento de variabilidad de los datos reales de producción. Ambos estudios recomiendan que la utilización de técnicas para la estimación de parámetros biofísicos del cultivo a partir de los sensores remotos, como por ejemplo el índice de área foliar, puedan mejorar los resultados de estimación de la producción de caña de azúcar.

Otro estudio relacionado con la estimación de productividad y biomasa a partir de información derivada de sensores remotos, lo llevó a cabo Simões et al. (2005). Utilizando espectrometría en campo, simuló bandas equivalentes del Landsat ETM+, demostrando la alta correlación que existe entre producción y biomasa con el NDVI y el RVI, alcanzando un valor de r^2 de 0.88. Integrando estos índices de vegetación a variables agronómicas, como índice de área foliar y número de tallos por metro, el autor desarrolló modelos de regresión múltiple para estimar producción y biomasa. Los modelos llegaron a explicar más del 95 por ciento de la variabilidad, al ser comparados con datos reales de producción y biomasa.

Así mismo, Pontes et al. (2005), demostraron que existe muy buena correlación entre el índice NDVI y la productividad del cultivo de caña de azúcar; es decir, el índice NDVI tiene el potencial para indicar la diferenciación productiva presente en el cultivo de caña de azúcar.

Por otro lado, Almeida et al. (2006), demostró el uso de índices de vegetación, análisis de componentes principales y datos históricos de producción para la estimación de productividad. El método requirió la transformación de datos espectrales (DN2) de imágenes Landsat ETM+ (30 m) y ASTER (15 m) en valores de producción. Los resultados reportaron errores de 5.65 por ciento y 2.67 por ciento para Landsat ETM+ y ASTER respectivamente, al utilizar en las transformaciones datos históricos de un año. Los errores fueron aún menores al incorporar datos históricos de dos años para la transformación de los valores espectrales, 0.90 por ciento para Landsat ETM+ y 0.89 por ciento para ASTER.

Por su parte, Lucas (2007) y Fortes (2003), mencionaron que el NDVI es un método sensible que normaliza los efectos de la topografía y puede ser utilizado para diagnosticar parámetros biofísicos con un alto grado de correlación y confiabilidad como indicador del área foliar, biomasa, cobertura vegetal del suelo, actividad fotosintética, productividad y modelado de la fenología. Ji-hua y Bingfang (2008), Machado (2007), Frasson (2007), Krishna Rao (2002) y Simões Dos Santos (2005), concluyeron que es una medida cuantitativa del vigor (variaciones de biomasa) del cultivo, lo cual denota la estimación de la biomasa total y el estatus de salud de la plantación y se relaciona directamente al rendimiento de campo.

En Colombia, Murillo et al. (2010) utilizó información del producto MOD13 (EVI) derivada del sensor MODIS (250 m), para evaluar la relación entre los datos acumulados del índice con datos de producción en el Valle del Cauca. Los resultados presentaron un coeficiente de determinación r^2 de 0.83 a partir de los datos acumulados de EVI. En adición, el estudio evaluó la capacidad de utilizar datos acumulados del índice de vegetación en meses previos a la cosecha (predicción de producción), con el fin de permitir a los productores realizar las medidas correctivas necesarias en el manejo agronómico para elevar la producción.

² Digital numbers (Números digitales): Valores que representan la intensidad de la respuesta espectral de un pixel, de acuerdo a la capacidad de almacenamiento de la imagen (bits).

4.3.3. Identificación de variedades

La identificación de variedades es otra de las aplicaciones de muy alto interés en las industrias azucareras del mundo. Murillo et al. (2006), justifica el desarrollo de herramientas para identificación varietal, ya que resulta de gran utilidad para el monitoreo de adopción y comportamiento de nuevas variedades desarrolladas por diversos centros de investigación.

Schmidt et al. (2000) reportó el uso del DMSV3 en una plataforma aérea, para la identificación de variedades en Suráfrica. Fortes et al. (2005) utilizando imágenes Landsat ETM+, desarrolló múltiples relaciones entre bandas e índices de vegetación que fueron discriminados de acuerdo a las características específicas de las variedades. Los resultados identificaron que la banda 4 del sensor (infrarrojo cercano) y el GNDVI4 fueron los más adecuados para la discriminación de variedades con un valor de 93.7 por ciento de certeza.

Otro estudio realizado en Colombia por Murillo et al. (2009) mostró resultados positivos utilizando productos Landsat ETM+ y técnicas estadísticas de discriminación espectral. Discriminando variedades de edades similares, el autor obtuvo resultados de una precisión de identificación del 75 por ciento.

Galvão et al. (2006) utilizó información del sensor hiperespectral EO-1 Hyperion para simular bandas espectrales de 6 sensores (AVHRR, SPOT 5, CCD, Landsat ETM+, ASTER y MODIS) en la identificación de 5 variedades de caña de azúcar en Brasil. Los resultados demostraron que la resolución espectral influye en la discriminación de variedades, obteniendo resultados de 58, 62, 66, 72, 72, 74 y 87 por ciento de precisión en la identificación de variedades para AVHRR, CCD, SPOT 5, Landsat ETM+, ASTER, MODIS e EO-1 Hyperion, respectivamente. Caso contrario, Gers (2003), no encontró diferencias significativas entre variedades de caña de azúcar surafricanas al evaluar diferentes técnicas de discriminación por medio del uso de Landsat ETM+.

³ Digital Multi-Spectral Video (Video cámara digital multiespectral)

⁴ Green NDVI

4.4. CONCLUSIONES DEL MARCO TEÓRICO

Los productores de caña de azúcar buscan constantemente formas de reducir costos, aumentar la productividad y los rendimientos, pero en general, son pocas las herramientas que se están aplicando para tal fin.

Ante los bajos indicadores de producción y rentabilidad de las zonas cañeras a nivel nacional, se requiere analizar los factores limitantes y los geoeconómicos del cultivo, mediante metodologías que permitan establecer la relación a nivel espacial y temporal entre las variables que caractericen los niveles de productividad.

Una de las formas de mayor rapidez es la utilización de imágenes de satélite, ya que pueden hacer posible el monitoreo y la estimación precisa del estado del cultivo de caña de azúcar en una región determinada a escala predio o unidad productiva, debido a el bajo costo adquisición de imágenes, su cobertura espacial y la posibilidad de generar los índices de sus bandas espectrales.

Las imágenes de satélite se han empleado en el área agrícola principalmente para estimar superficies cultivadas y rendimientos. Sin embargo, su uso ha sido limitado en la estimación de parámetros que miden el estrés hídrico en los cultivos.

Existen evidencias suficientes para pensar que la información contenida en las imágenes de satélite Landsat 7 ETM+ se relaciona con precisión adecuada con las características físicas propias de la superficie terrestre.

Esto hace factible la utilización de la información contenida en este tipo de imágenes de satélite, para la estimación del rendimiento, así como para caracterizar la variabilidad espacial y temporal de índices NDVI y MSI en grandes áreas cultivadas, como lo es la zona de abasto del Ingenio Emiliano Zapata.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.

5.1.1. Sitio de estudio.

El área de estudio se ubica dentro de la zona de abastecimiento del ingenio Emiliano Zapata, en el estado de Morelos. Dicha zona se localiza a una altura promedio de 1,480 metros sobre el nivel del mar (msnm) y sus coordenadas geográficas extremas son: al norte 19° 08', al sur 18° 20' de latitud norte, al este 98° 38' y al oeste 99° 30' de longitud oeste.

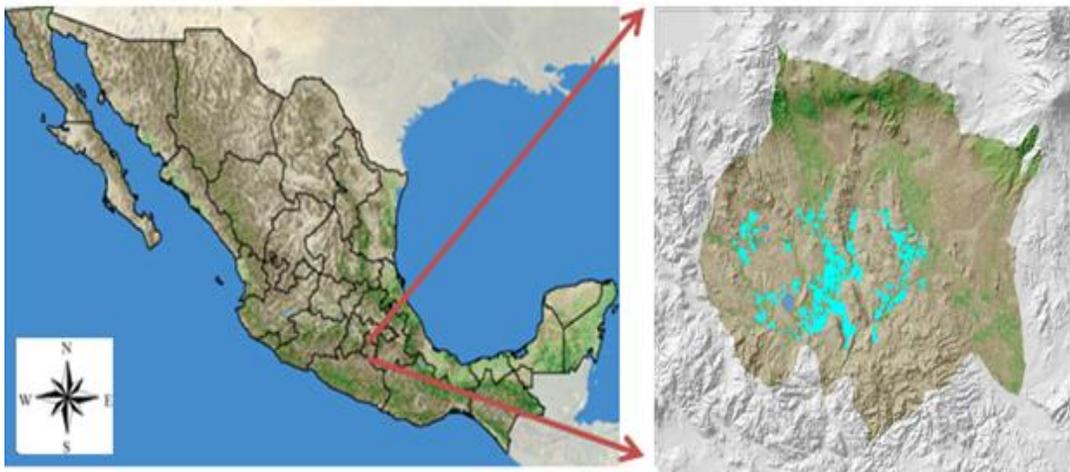


Figura 8. Localización geográfica del área de estudio.

El motivo de estudio de este distrito radica en el hecho de que el Estado de Morelos se ubica dentro de los primeros lugares como productor de este cultivo bajo condiciones de riego y temporal. De acuerdo con los datos de la SAGARPA, el ingenio Emiliano Zapata cuenta con un área de 10, 311 ha; sin embargo, el área de influencia del ingenio Emiliano Zapata es de 19, 735 ha, distribuidas principalmente en los municipios de Tlaltizapan, Jojutla, Ayala, Tlaquiltenango, Puente de Ixtla, Xochitepec y Zacatepec.

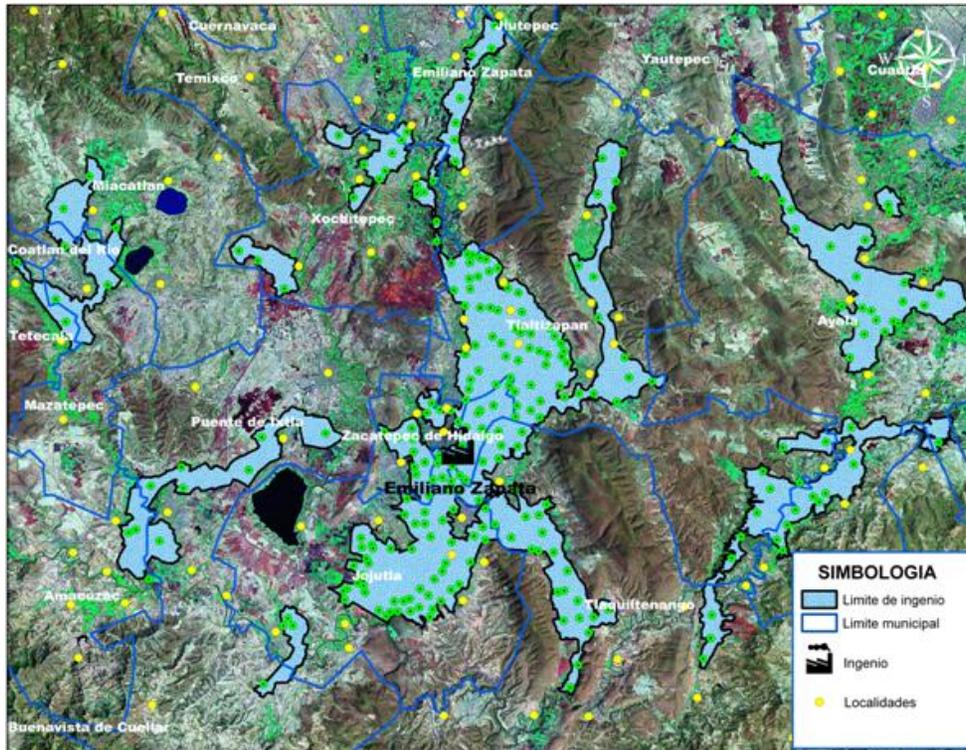


Figura 9. Delimitación de la zona de abasto del Ingenio Emiliano Zapata.

5.1.2. Clima.

El área de abasto del Ingenio que abarca el municipio de Ayala se encuentra en los valles del Plan de Amilpas. Su clima es cálido subhúmedo a menos de 1400 m sobre el nivel del mar. La precipitación y temperatura media anual son de 800 mm y 24°C, respectivamente. El viento tiene una dirección de noreste a suroeste. La vegetación es de selva baja caducifolia.

El relieve en Jojutla está compuesto básicamente de mesetas, lomeríos y cañadas. Las zonas planas abarcan un 65% del territorio y se localizan al norte del municipio, las zonas semiplanas con una extensión de 27% y al sur las accidentadas. El clima es cálido la mayor parte del año con temperatura promedio anual de 27°C. Entre abril y junio es superior a 30°C y de noviembre a enero se registran las temperaturas más bajas. La temporada de lluvia regularmente inicia junio y se prolonga hasta septiembre que promedian 917 mm al año. Se tiene como vegetación original selva baja caducifolia con vegetación secundaria.

Hacia Puente de Ixtla predomina un clima semiseco y cálido con invierno poco definido, con mayor sequía a finales de otoño, invierno y principios de primavera. Su temperatura media anual es de 25°C, con precipitación anual de 930 mm, presentándose las lluvias entre mayo y septiembre, cuya vegetación original está formada por selva baja caducifolia.

En Tlaltizapán se encuentran zonas con accidentes orográficos que cubren el 17% del terreno en el norte y sur. Al sureste hay zonas semiplanas con una extensión de 37% del terreno en las faldas de los cerros y zonas planas que abarcan el 46% en el centro. El clima es subtropical y húmedo caluroso con invierno poco definido, con la mayor sequía al final del otoño, invierno y principios de primavera. La temperatura media anual es de 23.5°C con una precipitación pluvial de 840 mm anuales, cuyo periodo de lluvias va de junio a octubre.

La orografía de Tlaquiltenango destacan las zonas semiplanas con 38% de su superficie localizadas al centro y sur, así como las partes planas con el 18% de la superficie total al noroeste y en zonas dispersas del territorio. Existen dos tipos de climas uno semiseco semicálido y el otro semiseco cálido, invierno poco definido, con la mayor sequía al finalizar el otoño, en invierno y principios de primavera. Las temperaturas oscilan entre 15°C y 35°C, la precipitación es de 900.0 mm de lluvia anual.

En Zacatepec de Hidalgo se tiene un clima semiseco cálido, con invierno poco definido, sequía a fines de otoño, invierno y principios de primavera y con un periodo de lluvias de junio a octubre, mientras que en Xochitepec es templado, caliente, semiseco, con invierno poco definido y la mayor sequía al final del otoño-invierno y principios de primavera, la temperatura es de 23°C con una máxima de 28°C y mínima de 12.9°C.

La Fundación PRODUCE del Estado de Morelos cuenta con 23 estaciones agrometeorológicas en operación, de las cuales, la más representativa para el área de estudio, corresponde a la estación INIFAP, cuya información será utilizada para la presente investigación. Ver figura 10.

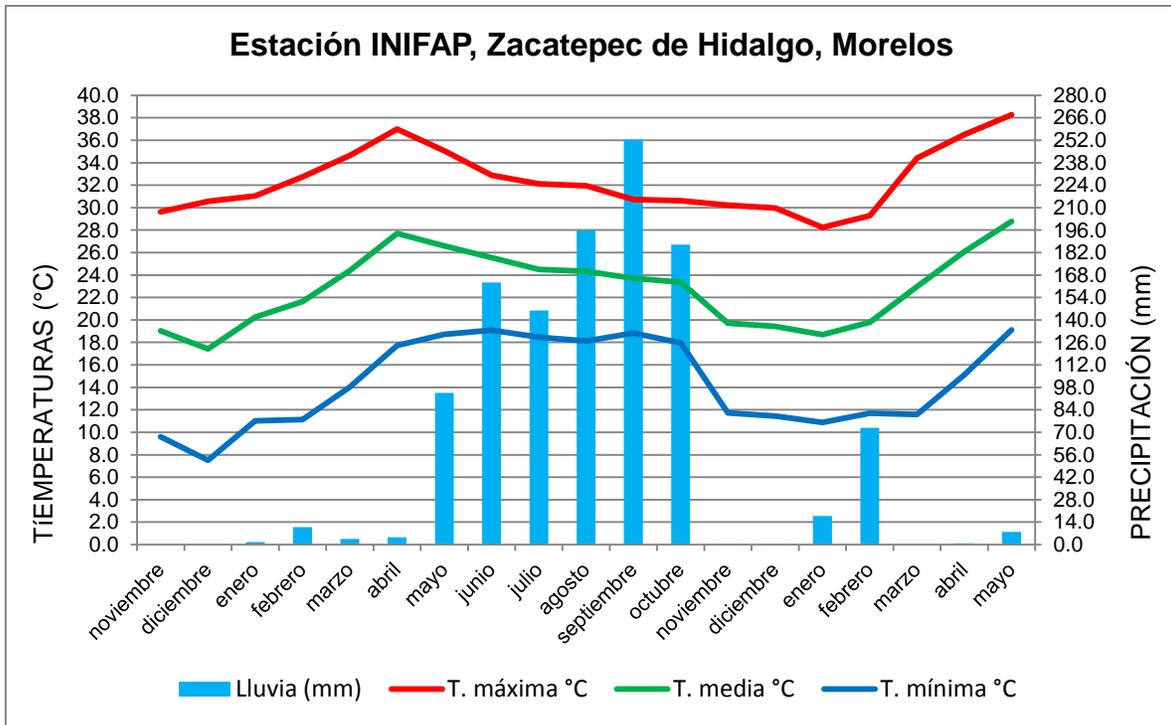


Figura 10. Distribución anual de la temperatura y precipitación en la zona de abasto del Ingenio Emiliano Zapata.

5.1.3. Suelos.

Los tipos de suelos que en su mayoría predominan en la zona de estudio son los siguientes: Vertisoles Suelos pesados (arcillosos), difíciles de laborar y drenaje interno con tendencia a deficiente, aunque suelen tener un buen nivel de fertilidad.

Chernozem: Son suelos que a 15 cm de la superficie presentan altos contenidos de material orgánico y a más profundidad tienen de moderada a alta concentración de caliza pulverulenta. Los cultivos que prosperan en este suelo pueden presentar síntomas de deficiencia de hierro.

Castañozem. En los primeros 15cm de profundidad tienen un buen contenido de materia orgánica y color pardo o castaño, pero en el estrato inferior tienen altas concentraciones de caliza pulverulenta y color claro.

Rendiza: con fases líticas, con lecho rocoso entre los primeros 10 cm y 50 cm de profundidad.

Feozem háplico: Estos suelos aunque son profundos, se encuentran en los lomeríos y sierras, con vegetación natural de selva baja caducifolia.

Litsoles: Son suelos delgados con menos de 10cm de profundidad, pedregosos, topografía accidentada y susceptibles a la erosión. En el cuadro 2 se muestran los indicadores de la condición edáfica y del riesgo de inundación prolongada en el área de estudio.

Cuadro 2. Indicadores de la condición edáfica en el área de abasto del Ingenio Emiliano Zapata, Morelos.

| Condición de los suelos | *CE | pH | *MO | *Ac Int. | *IRI |
|-------------------------|--------------------------------------|----|-----|----------|------|
| | Porcentaje de los valores observados | | | | |
| Sin problemas | 73 | 99 | 68 | 100 | 92 |
| Con problemas | 27 | 1 | 32 | 0 | 8 |

*CE=conductividad eléctrica; MO= materia orgánica; A Int.=acidez intercambiable; IRI= Índice del riesgo de tener condiciones de inundación prolongada.

En el área de abasto del Ingenio todavía se encuentran suelos con suficiente cantidad de materia orgánica, lo cual hace propicio una serie de condiciones físicas de los terrenos para la producción de la caña. Aunque hay terrenos susceptibles a problemas con posible inundación prolongada, la severidad de su efecto sobre la producción de la caña de azúcar dependerá de la frecuencia e intensidad de la precipitación en las partes planas, aunado a condiciones de mal drenaje natural.

Un factor que también es necesario tomar en cuenta es el ambiente químico edáfico, el cual presenta condiciones alcalinas y calcáreas en diversas zonas, lo cual puede limitar la disponibilidad de micronutrientes metálicos. En el cuadro 3 se presenta la distribución de frecuencia de la concentración de sales solubles, representada por la conductividad eléctrica (CE), pH, sodio y carbonato de calcio equivalente.

Cuadro 3. Distribución de frecuencia de la conductividad eléctrica (CE), pH, sodio y carbonato de calcio equivalente.

| CE | Frecuencia | pH | Frecuencia | Na | Frecuencia | CaCO ₃ | Frecuencia |
|--------------------|------------|-----------|------------|---------------------|------------|-------------------|------------|
| dS m ⁻¹ | % | | % | mg Kg ⁻¹ | % | % | % |
| <1 | 36 | <6.5 | 6.3 | <100 | 27.9 | <2.5 | 62.9 |
| 1 a 2 | 36.8 | 6.5 a 7.5 | 22.4 | 100 a 300 | 66.2 | 2.5 a 5.0 | 6.3 |
| 2 a 3 | 18.8 | 7.5 a 8.5 | 69.9 | 300 a 600 | 4.4 | 5.0 a 10.0 | 8.8 |
| >3 | 8.5 | >8.5 | 1.5 | >600 | 1.5 | >10.0 | 22.1 |

Queda de manifiesto el predominio de suelos alcalinos y calcáreos. La alta concentración de sales solubles en la solución del suelo puede afectar de manera importante la producción de caña, esto debido a que causan diversos efectos nocivos tanto en la absorción de nutrientes como en la capacidad productiva de los suelos. En el cuadro 4 se presenta la condición nutrimental del calcio, magnesio, hierro, cobre, zinc y manganeso en el área de abasto del Ingenio Emiliano Zapata, Morelos.

Cuadro 4. Condición nutrimental de elementos secundarios y menores en los suelos del área de abasto del Ingenio Emiliano Zapata, Morelos.

| Condición nutrimental | Calcio | Magnesio | Hierro | Cobre | Zinc | Manganeso |
|-----------------------|--------|----------|--------|-------|------|-----------|
| Bajo (%) | 0 | 0 | 1 | 74 | 89 | 1 |
| Superávit (%) | 100 | 100 | 99 | 26 | 11 | 99 |

Los nutrientes secundarios en el suelo están en una condición de superávit. En contraste, los elementos menores están en niveles identificados como bajos o cercanos a ellos, sobre todo en el caso del cobre y zinc; sin embargo, esto no implica que por el momento se deba tomar alguna medida correctiva, puesto que el nivel productivo actual de la caña de azúcar en el área de estudio es alto.



Figura 11. Condición actual del suelo.

5.1.4. Descripción del DR 016.

El Distrito de Riego 016, Estado de Morelos, se creó mediante Acuerdo de establecimiento de fecha 30 de septiembre de 1953, publicado en el Diario Oficial de la Federación el día 14 de Noviembre del mismo año, por la extinta Secretaría de Recursos Hidráulicos; está enclavado en los Municipios de Coatlan del Rio, Puente de Ixtla , Zacatepec, Jojutla, Cuernavaca, Yautepec, Cautla, Jantetelco Ayala, Tetecala, Xochitepec, Jiutepec, Tlaltizapan, Yecapixtla, Jonacatepec. Amacuzac, Miacatlan, Temixco, Ocuituco, Tetela del Volcán, Emiliano Zapata, Tlaquiltenango, Zacualpan, Tepalcingo y Tlayacapan.

El Distrito de Riego 016 Estado de Morelos, se ubica en la Región Administrativa No. IV Balsas y se localiza tomando parte de la Región Hidrológica hidrológicas No.18 Balsas. El distrito se localiza a una altura promedio de 1,480 metros sobre el nivel del mar (msnm) y sus coordenadas geográficas extremas son: al norte 19° 08', al sur 18° 20' de latitud norte, al este 98° 38' y al oeste 99° 30' de longitud oeste.

El distrito está integrado por 8 módulos de riego, con una superficie total aproximada de 33,654 ha y 19,350 usuarios, utiliza un volumen de agua anual aproximado de 772 hm, y sus cultivos principales son caña de azúcar, arroz, maíz, cebolla, tomate, jícama, pepino, calabacita y ornamentales. En las Urderales, con 207 unidades, se cultivan de manera importante: ornamentales, durazno, aguacate, jitomate, cebolla, entre otros.

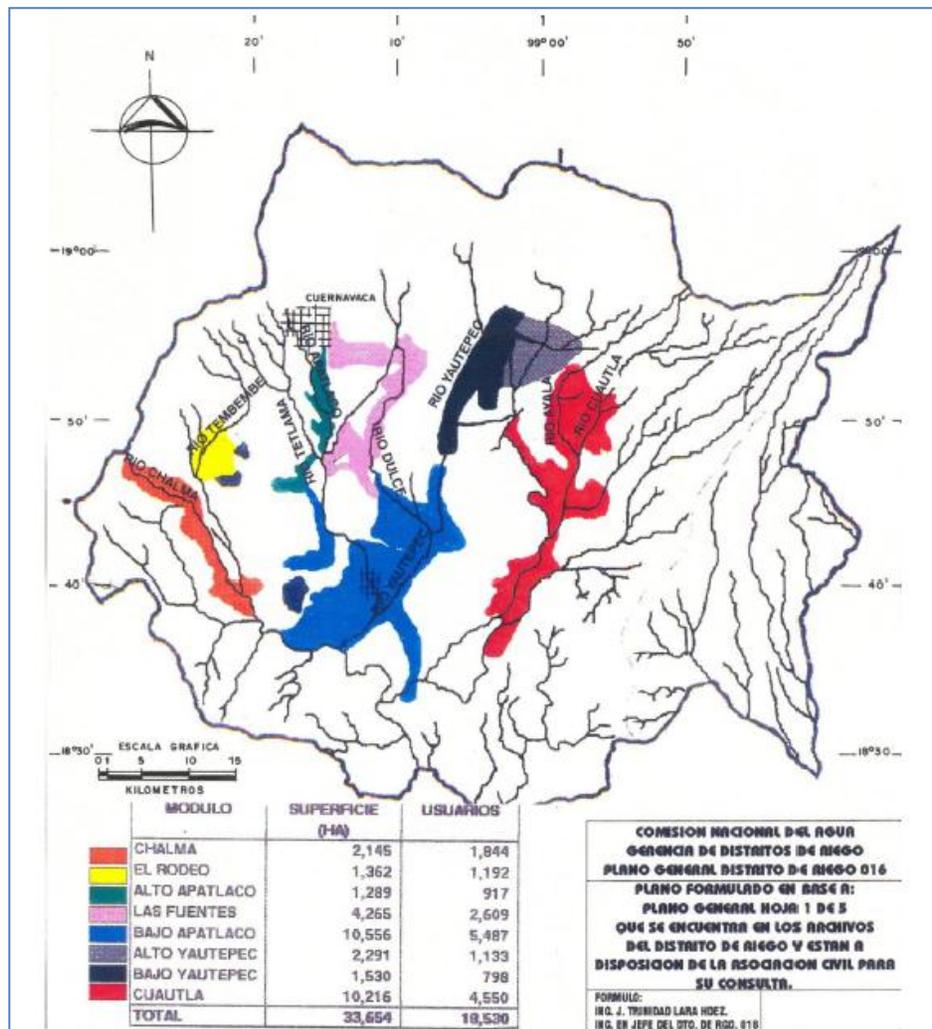


Figura 12. Módulos de riego del Distrito de Riego 016 Estado de Morelos.
 Fuente: Jefatura de Distrito de Riego 016. Zacatepec. 2006.

El distrito de riego es abastecido por algunos ríos que están comprendidos dentro de la cuenca del río Amacuzac, dichos ríos son los siguientes: Apatlaco, Yauatepec, Dulce, Cjautla, Chalma, Tembebe, Tetlama y Palo Escrito.

Actualmente, se estima que en Morelos se utiliza un volumen anual de agua superficial, proveniente de los principales ríos y manantiales del estado de alrededor de 1,022 hm³, de los cuales el 80% se extrae de las cuencas de los ríos Apatlaco, Yautepec y Cuautla. La mayoría de estos manantiales se localizan en la porción central y septentrional del estado y sobresalen por su gran caudal: Las Estacas, Fundición, Chapultepec y El Salto.

Cuadro 5. Módulos del Distrito de Riego 016 Estado de Morelos.

| MODULO | FUENTE | SUPERFICIE (HA) | USUARIOS |
|----------------------|---|------------------------|-----------------|
| Río Chalma | Río Chalma (8 Presas Derivadoras) | 2,145 | 1,844 |
| Unidad El Rodeo | Río Temembe (Presa El Rodeo) (4 Presas Derivadoras) | 1,362 | 1,192 |
| Alto Apatlaco | Parte Alta Del Río Apatlaco (5 Presas Derivadoras) | 1,289 | 917 |
| Las fuentes | Manantiales: Chapultepec, Cuahuchiles, Las Fuentes, Palo Escrito, San Ramón, Salado Santa Rosa | 4,265 | 2,609 |
| Bajo Apatlaco | Parte Baja Del Río Apatlaco, Río Yautepec Y Río Tetlama (17 Presas Derivadoras); Manantiales: Chihuahuita, Temimilcingo, Zapotal, La Meza, Del Pueblo, Los Ricos, Santísimo, La Taza, Estacas I, Estacas II, Agua Dulce | 10,556 | 5,487 |
| Unidad Alto Yautepec | Río Yautepec (3 Presas Derivadoras); Manantiales: Ahuilican y Michate | 2,2991 | 1,133 |
| Unidad Bajo Yautepec | Río Yautepec (4 Presas Derivadoras); Manantial Michate | 1,530 | 798 |
| Río Cuautla | Río Cuautla Y Río Ayala (14 Presas Derivadoras); Manantiales: La Mora, Agua Dulce, Santa Rosa, La Huancha, Casasano, Santa Ines, Xochitengo, Axocoche; Barranca La Huitchila | 10,216 | 4,550 |
| Total | | 33,654 | 19.350 |

Fuente: Actas de constitución de Asociaciones. Archivo de la Jefatura de Distrito de Riego 016.

5.1.5. Operación del DR 016 Estado de Morelos.

La operación del Distrito tiene como objetivo fundamental el proporcionar el servicio de riego a los 8 Módulos indicados anteriormente, realizando la planeación de la distribución del agua en función de la disponibilidad en el sistema de almacenamiento del Distrito. Las necesidades de agua de cada módulo de riego se hacen llegar a la Gerencia del Distrito a través de la Gerencia de cada Módulo. La distribución del agua es responsabilidad de la CONAGUA únicamente a nivel de red mayor. Hacia el interior de los Módulos de riego, son ellos mismos los que controlan la distribución del agua. El agua es entregada a cada Módulo en puntos de control específicos.

La operación del Distrito, en lo fundamental, no sufrió grandes cambios a raíz de la transferencia del Distrito a los usuarios, ya que las unidades de riego en las que antes se dividía para su operación el Distrito, pasaron a formar los Módulos.

Cuadro 6. Transferencia del Distrito de Riego 016.

| Módulo de Riego | Asociación de usuarios a la que fue transferido: |
|------------------------|--|
| Chalma | Usuarios de Riego del río Chalma revolución del sur, A.C. Modulo 1 |
| El Rodeo | No se transfirió, se transformó en unidad de riego |
| Alto Apatlaco | Asociación de usuarios del alto Apatlaco, A.C. Modulo 3 |
| Las Fuentes | Unión de usuarios cuenca de las Fuentes, A.C. Modulo 4 |
| Bajo Apatlaco | Asociación de usuarios Agro siglo XXI, A.C. Modulo 5 |
| Alto Yautepec | No se transfirió, se transformó en unidad de riego |
| Bajo Yautepec | No se transfirió, se transformó en unidad de riego |
| Cuautla | General Eufemio Zapata Salazar, A.C. Modulo 8 |

Fuente: Actas de constitución de Asociaciones. Archivo de la Jefatura de Distrito de Riego 016.

Como se indicó anteriormente, el plan de riegos considera únicamente a las superficies regadas con aguas de las presas, dejando en forma libre para decidir a los usuarios de pozos particulares. Este plan de riegos se formula a partir de la disponibilidad de agua en las presas al día 1 de octubre, y se programa en un inicio para O-I, replanteándose al término del mismo para P-V y S-C.

5.1.6. Cultivo de caña de azúcar en el área de estudio.

El estado de Morelos tiene una superficie total de 495 mil 850 ha de las cuales en 2007 se destinaron 136 mil 046 ha para fines agrícolas: 102 mil 949 ha correspondieron a cultivos anuales y el resto a perennes. Los granos, semillas y caña de azúcar ocupan 102 mil 203 ha, las hortalizas 14 mil 746 ha y los frutales 8 mil 280 ha cuya aportación al producto interno bruto agrícola de la Entidad es de 39, 32 y 15 % respectivamente (INIFAP, 2009).

La superficie promedio que se siembra con caña es alrededor de 16 mil hectáreas, de la cual se tiene una producción promedio de 1.7 millones de toneladas. La cosecha diaria, ronda de 6 mil a 7 mil toneladas. Cabe mencionar que Morelos es el estado que obtiene los rendimientos más altos del país: 112.5 toneladas por hectárea (SIAP, 2008).

5.2. MATERIALES.

5.2.1. Equipos de medición.

El equipo a utilizar en este estudio está conformado por:

- a) GPS (Sistema Posicionador Global), para determinar coordenadas geográficas de los puntos de muestreo,
- b) Equipo PC, para procesamiento de imágenes y capacidad de almacenamiento de datos, vehículo y cámara fotográfica.

5.2.2. Imágenes de satélite.

Se adquirieron 30 imágenes del satélite Landsat 7 ETM+ de fecha 21 de octubre de 2008 a 21 de junio de 2010 (periodo que comprende las distintas etapas de desarrollo del cultivo de caña de azúcar), las cuales fueron obtenidas de la página web: Global visualización de USGS Visor de <http://glovis.usgs.gov/>. Dichas imágenes constan de ocho bandas con una resolución espacial de 30 m para las seis bandas reflectivas (1 a 5 y 7), 15 m para la banda pancromática (8) y 60 m para la banda térmica (6) (Figura 13).

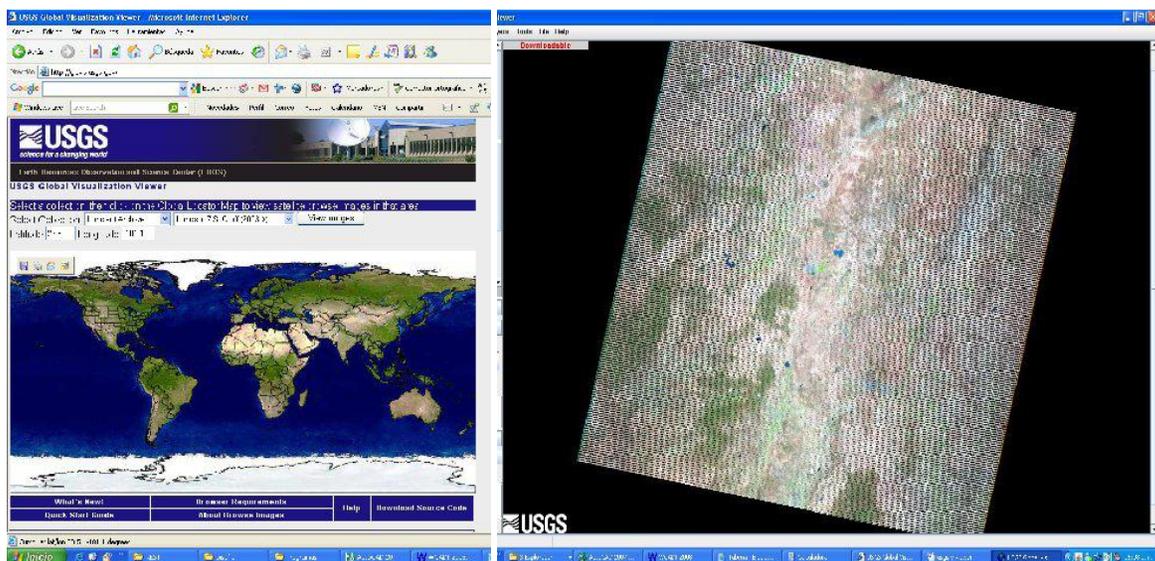


Figura 13. Imagen Landsat correspondiente a la zona de abasto del Ingenio.

Se presenta a continuación un cuadro que muestra la nomenclatura y fechas de imágenes de satélite Landsat ETM+.

Cuadro 7. Imágenes de satélite Landsat 7ETM+ utilizadas en el monitoreo del cultivo de caña de azúcar.

| ID | CLAVE | NOMBRE | FECHA |
|----|-----------------------|-----------------------|------------|
| 1 | LE70260472008311EDC00 | L71026047_04720081106 | 06/11/2008 |
| 2 | LE70260472008327ASN00 | L71026047_04720081122 | 22/11/2008 |
| 3 | LE70260472008343ASN00 | L71026047_04720081208 | 08/12/2008 |
| 4 | LE70260472008359EDC00 | L71026047_04720081224 | 24/12/2008 |
| 5 | LE70260472009009ASN00 | L71026047_04720090109 | 09/01/2009 |
| 6 | LE70260472009025EDC00 | L71026047_04720090125 | 25/01/2009 |
| 7 | LE70260472009041ASN00 | L71026047_04720090210 | 10/02/2009 |
| 8 | LE70260472009057EDC00 | L71026047_04720090226 | 26/02/2009 |
| 9 | LE70260472009073EDC00 | L71026047_04720090314 | 14/03/2009 |
| 10 | LE70260472009089EDC00 | L71026047_04720090330 | 30/03/2009 |
| 11 | LE70260472009105EDC00 | L71026047_04720090415 | 15/04/2009 |
| 12 | LE70260472009121ASN00 | L71026047_04720090501 | 01/05/2009 |
| 13 | LE70260472009137EDC00 | L71026047_04720090517 | 17/05/2009 |
| 14 | LE70260472009153ASN00 | L71026047_04720090602 | 02/06/2009 |
| 15 | LE70260472009169EDC01 | L71026047_04720090618 | 18/06/2009 |
| 16 | LE70260472009185ASN00 | L71026047_04720090704 | 04/07/2009 |
| 17 | LE70260472009201EDC00 | L71026047_04720090720 | 20/07/2009 |
| 18 | LE70260472009217EDC00 | L71026047_04720090805 | 05/08/2009 |
| 19 | LE70260472009233EDC00 | L71026047_04720090821 | 21/08/2009 |
| 20 | LE70260472009265EDC00 | L71026047_04720090922 | 22/09/2009 |
| 21 | LE70260472009281EDC00 | L71026047_04720091008 | 08/10/2009 |
| 22 | LE70260472009329EDC00 | L71026047_04720091125 | 25/11/2009 |
| 23 | LE70260472009345ASN00 | L71026047_04720091211 | 11/12/2009 |
| 24 | LE70260472009361ASN00 | L71026047_04720091227 | 27/12/2009 |
| 25 | LE70260472010028EDC00 | L71026047_04720100128 | 28/01/2010 |
| 26 | LE70260472010044EDC00 | L71026047_04720100213 | 13/02/2010 |
| 27 | LE70260472010060ASN00 | L71026047_04720100301 | 01/03/2010 |
| 28 | LE70260472010076EDC00 | L71026047_04720100317 | 17/03/2010 |
| 29 | LE70260472010108EDC00 | L71026047_04720100418 | 18/04/2010 |
| 30 | LE70260472010124EDC00 | L71026047_04720100504 | 04/05/2010 |

5.2.3. Software.

Para el análisis y procesamiento digital de las imágenes de satélite se utilizarán los Sistemas de Información Geográfica (SIG), IDRISI®, ArcView® y ERDAS®, así como el desarrollado por Palacios (2007) para la Corrección Atmosférica y para la estimación de valores promedio de índices dentro de los límites de las parcelas de estudio.

5.2.4. Catastro de la zona de estudio.

El Colegio de Postgraduados, específicamente la especialidad de Hidrociencias en convenio con la SAGARPA, desarrolló el proyecto de Desarrollo de un Modelo Integral de Sistema de Información Geográfica y Edáfica como Fundamento de la Agricultura de Precisión en la Caña de Azúcar en México, del cual se tienen los datos para la zona de abasto del Ingenio Emiliano Zapata de catastro y padrón de usuarios en la plataforma (SIG) ArcView.

En este sistema se trazaron las parcelas sobre ortofotos con resolución espacial de 2 m, con el apoyo de planos parcelarios; a la que se ligo el padrón de usuarios, como base de datos de los lotes o parcelas. Básicamente las parcelas pueden identificarse por el número de cuenta y subcuenta, usuario, etc, y permite alta flexibilidad de manejo de la base de datos enlazado al sistema gráfico y grandes ventajas para la administración del sistema. Este catastro fue de utilidad para la ubicación de las parcelas en el SIG.

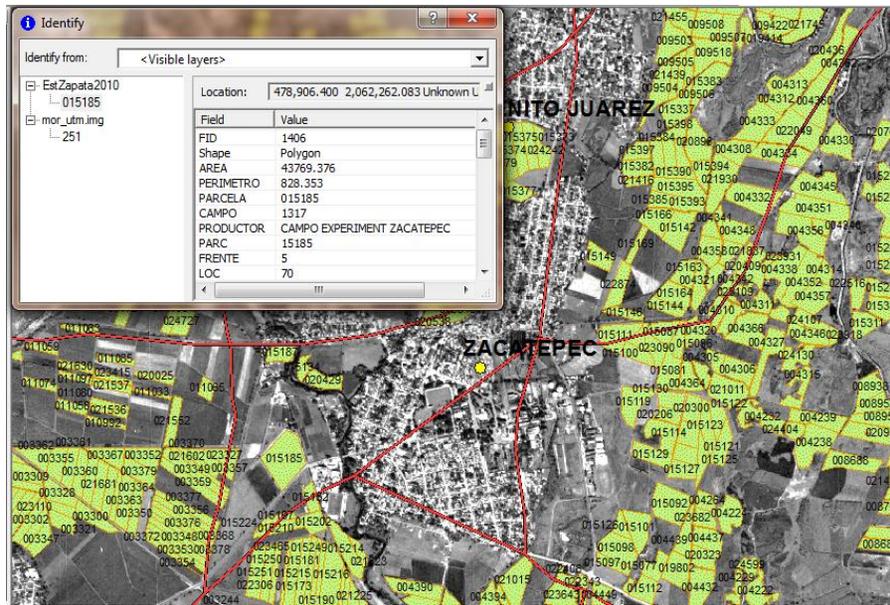


Figura 14. Sistema de información geográfica del área de abasto del Ingenio.

5.2.5. Información agrometeorológica.

Para el monitoreo de datos meteorológicos, se han utilizado las estaciones automáticas que tiene la red de estaciones agroclimáticas de Morelos, disponible en la Web en la siguiente dirección: www.clima.inifap.gob.mx.



Figura 15. Estaciones Agroclimáticas de Morelos.

De manera particular, se obtuvo información Agrometeorológica de la estación INIFAP (Figura 16). Dicha estación es la más representativa para el área de estudio y se encuentra localizada en el Municipio de Zacatepec, dentro de las instalaciones del Campo Experimental del INIFAP.

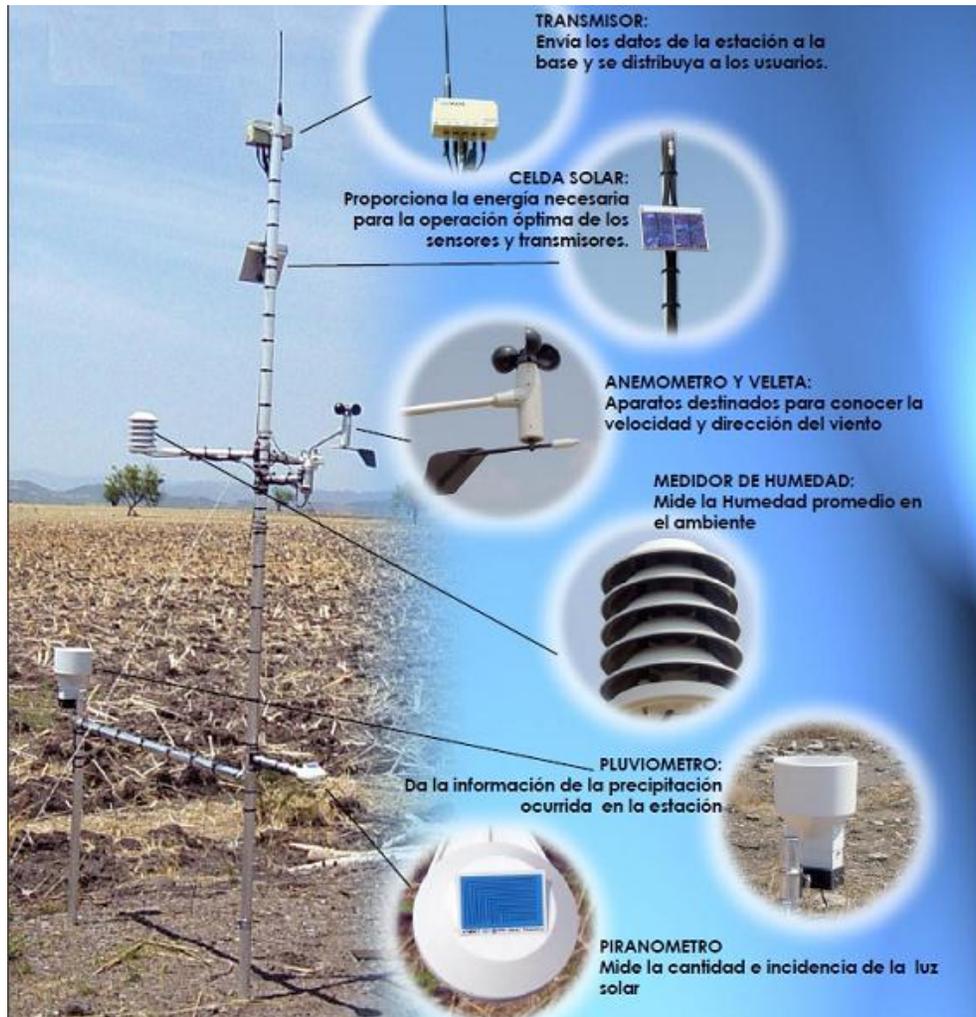


Figura 16. Equipo de medición de estación Agrometeorológica INIFAP.

En dicha estación se monitorearon datos diarios de: temperatura, lluvia, humedad relativa, precipitación, punto de rocío, radiación en hoja foliar, velocidad y dirección del viento y evapotranspiración. En el cuadro 8 se muestran los datos diarios correspondientes a las fechas en que se obtuvieron las imágenes Landsat, para el ciclo agrícola 2009-2010.

Cuadro 8. Datos meteorológicos obtenidos de la estación INIFAP.

| Fecha | Prec. | T. Máx. | T. Mín. | T. Med. | VV máx. | DVV máx. | VV | DV | HR | ETr |
|------------|-------|---------|---------|---------|---------|------------|------|-------------|-------|-----|
| 06/11/2008 | 0 | 28 | 7 | 16.41 | 3.2 | 128.5 (SE) | 0.63 | 252.2 (O) | 68.02 | 4 |
| 22/11/2008 | 0 | 28.4 | 8.7 | 18.71 | 6.6 | 235.7 (SO) | 1.34 | 240.86 (SO) | 58.59 | 3.6 |
| 08/12/2008 | 0 | 28.9 | 8.6 | 17.69 | 3.7 | 144.7 (SE) | 0.74 | 144.23 (SE) | 66.44 | 2.6 |
| 24/12/2008 | 0 | 31 | 7.7 | 17.78 | 3.6 | 84.4 (E) | 0.58 | 331.74 (NO) | 62.15 | 2.9 |
| 09/01/2009 | 0 | 31.7 | 8.6 | 18.84 | 4.3 | 157.1 (SE) | 0.84 | 198.28 (S) | 59.54 | 3.1 |
| 25/01/2009 | 0 | 32.3 | 8.7 | 19.7 | 4.5 | 90.7 (E) | 0.88 | 57.92 (NE) | 48.72 | 3.9 |
| 10/02/2009 | 0 | 32.6 | 10.8 | 21.72 | 8.7 | 256.4 (O) | 1.66 | 197.73 (S) | 48.75 | 4.4 |
| 26/02/2009 | 0 | 35.8 | 8.4 | 21.29 | 3.7 | 155.4 (SE) | 0.98 | 270.7 (O) | 37.18 | 4.9 |
| 14/03/2009 | 0 | 34.4 | 16.1 | 25.02 | 5.1 | 231.6 (SO) | 1.29 | 312.84 (NO) | 37.88 | 5.2 |
| 30/03/2009 | 0 | 37.1 | 12.6 | 25.52 | 8.5 | 275.2 (O) | 2.78 | 174.95 (S) | 26.95 | 6.4 |
| 15/04/2009 | 0 | 37.1 | 18.6 | 27.7 | 7.7 | 157 (SE) | 2.04 | 354.81 (N) | 36.68 | 6.1 |
| 01/05/2009 | 0 | 36.8 | 19.2 | 28.37 | 15 | 119.6 (SE) | 2.48 | 184.66 (S) | 34.46 | 5.7 |
| 17/05/2009 | 14 | 33.2 | 19.4 | 23.57 | 7.7 | 239.7 (SO) | 1.69 | 218.23 (SO) | 74.68 | 4.1 |
| 02/06/2009 | 2.2 | 32.8 | 18.5 | 24.86 | 4.4 | 138.7 (SE) | 1.04 | 284.72 (O) | 67.25 | 4.3 |
| 18/06/2009 | 18.4 | 34 | 19 | 24.48 | 19.1 | 10.7 (N) | 2.01 | 267.55 (O) | 76.42 | 3.8 |
| 04/07/2009 | 5.8 | 31.1 | 19.2 | 23.26 | 9.6 | 331.8 (NO) | 1.34 | 156.2 (SE) | 79.92 | 3.5 |
| 20/07/2009 | 6.2 | 32.5 | 18.7 | 24.68 | 4.8 | 5.3 (N) | 1.17 | 229.46 (SO) | 66.18 | 4.4 |
| 05/08/2009 | 8.6 | 33.5 | 18.8 | 23.95 | 14.4 | 62.2 (NE) | 2.07 | 94.25 (E) | 75.34 | 4.9 |
| 21/08/2009 | 0.4 | 31.3 | 19.5 | 24.16 | 10.6 | 126.5 (SE) | 1.37 | 47.75 (NE) | 78.45 | 5 |
| 22/09/2009 | 13.8 | 30.7 | 18.4 | 23.79 | 6.3 | 5.3 (N) | 1.03 | 127.01 (SE) | 80.82 | 4.7 |
| 08/10/2009 | 0 | 31.3 | 20.1 | 24.75 | 5.7 | 239.3 (SO) | 1.31 | 243.19 (SO) | 76.08 | 4.1 |
| 25/11/2009 | 0 | 30.5 | 10.6 | 19.81 | 2.5 | 169.1 (S) | 0.53 | 245.33 (SO) | 68.47 | 3.3 |
| 11/12/2009 | 0 | 30.5 | 13.1 | 20.89 | 3.3 | 64.6 (NE) | 0.59 | 47.01 (NE) | 75.64 | 3.2 |
| 27/12/2009 | 0 | 32.1 | 8.3 | 18.52 | 3.2 | 135.6 (SE) | 0.59 | 57.88 (NE) | 64.33 | 3.5 |
| 28/01/2010 | 0 | 30.1 | 10.5 | 19.72 | 5.2 | 107.8 (E) | 0.62 | 331.93 (NO) | 62.45 | 3.4 |
| 13/02/2010 | 0 | 31.6 | 11.3 | 20.44 | 7.6 | 229.5 (SO) | 1.58 | 149.48 (SE) | 61.36 | 4.6 |
| 01/03/2010 | 0 | 31.9 | 8.8 | 19.79 | 8 | 215.8 (SO) | 1.73 | 263.42 (O) | 51.65 | 4.8 |
| 17/03/2010 | 0 | 34.3 | 11.1 | 23.36 | 7.4 | 21 (N) | 1.6 | 188.27 (S) | 50.64 | 5.2 |
| 18/04/2010 | 0 | 34.6 | 11.7 | 23.92 | 6.4 | 73.8 (E) | 1.56 | 34.85 (NE) | 37.04 | 5.5 |
| 04/05/2010 | 0 | 39 | 15 | 27.47 | 6.9 | 248 (O) | 1.61 | 75.56 (E) | 32.97 | 5.1 |

5.3. MÉTODO.

Para el cumplimiento de los objetivos planteados y probar la significancia de las hipótesis, se han realizado actividades tanto de gabinete y campo, por lo que se describe este componente desglosado en actividades preliminares de gabinete, actividades de campo y análisis de la información en gabinete.

5.3.1. Actividades preliminares de gabinete.

Se efectuó actividades de procesamiento de información correspondiente a la zona de abastecimiento del Ingenio Emiliano Zapata, en los aspectos descritos a continuación:

5.3.1.1. Tratamiento y transformación de imágenes.

Se realizó el recorte, corrección atmosférica y seguidamente, se transformaron los valores de radiancia a reflectancia aparente con el fin de expresar los resultados en valores físicos. Estos cálculos permitieron transformar los valores originales de cada imagen Landsat en parámetros físicos, logrando así que fueran comparables en el tiempo, aún bajo condiciones atmosféricas diferentes.

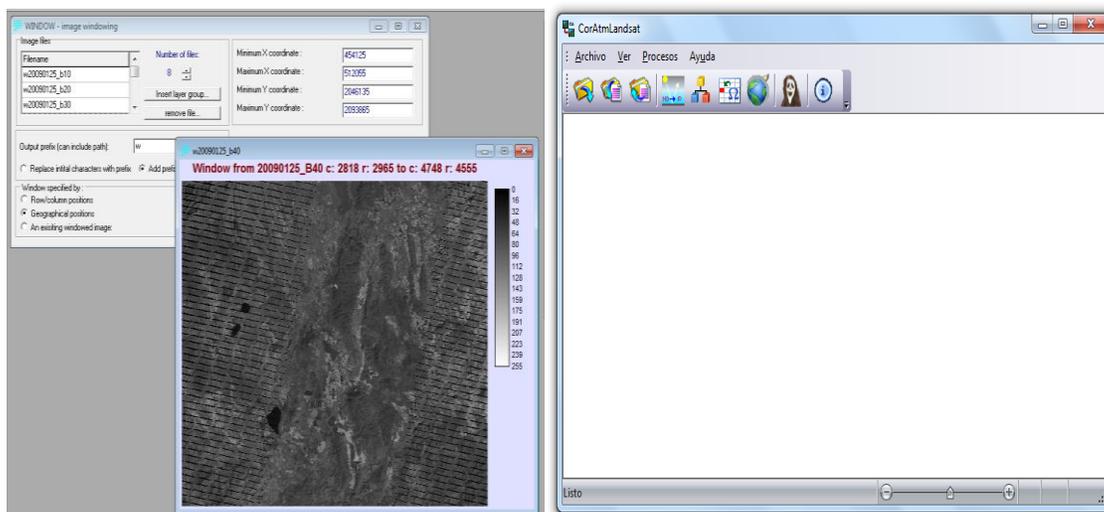


Figura 17. Procesamiento de imágenes Landsat.

Paralelamente se obtuvieron las imágenes compuestas en falso color, tal como se muestra en la figura 18:

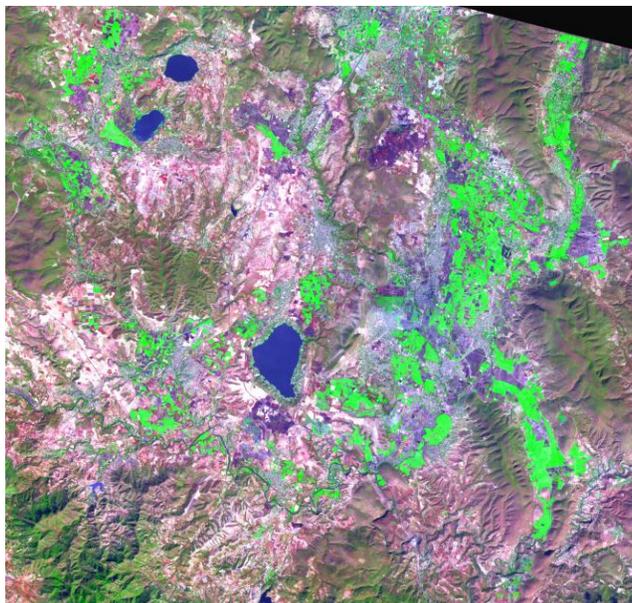


Figura 18. Imagen compuesta en falso color del satélite Landsat 7 ETM+ correspondiente a la zona de estudio de fecha diciembre de 2008.

5.3.1.2. Índice de vegetación de diferencias normalizadas (NDVI).

La notable diferencia de la reflectividad entre las bandas visibles y los infrarrojos, especialmente el rojo (que es utilizado en la fotosíntesis) y la del infrarrojo cercano (que es reflejado), permite calcular varios índices de vegetación, que pueden ser un buen indicador del desarrollo de los cultivos y aún estimar su rendimiento futuro. Entre estos índices suele utilizarse para medir el desarrollo de la vegetación, el denominado “Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas” (NDVI por sus siglas en inglés), Rouse et al. (1974) citado por Jensen (2000), cuyo valor se calcula con las reflectividades en las bandas roja (ρ_r) (0.60 a 0.70 μm) e infrarroja cercana (ρ_i) (0.70 a 0.13 μm), cuya fórmula para su cálculo es:

$$NDVI = \frac{\rho_i - \rho_r}{\rho_i + \rho_r} \quad (1)$$

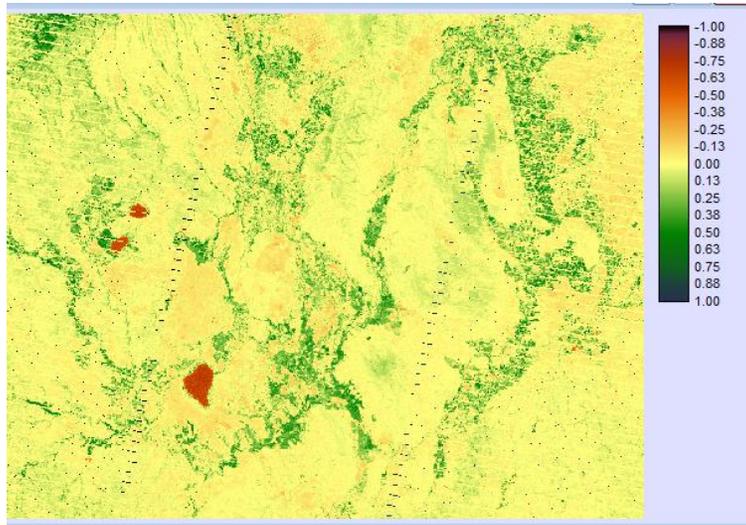


Figura 19. Imagen compuesta de NDVI-Reflectancia Landsat 7 (21-10-08).

5.3.1.3. Índice de estrés de humedad (MSI).

Otro índice, que es útil en la estimación del estrés hídrico en las hojas de las plantas es el denominado “índice de estrés de humedad” (MSI, por sus siglas en ingles), Rock et al. (1986) citado por Jensen (2000), que se calcula como la relación entre las reflectividades en las bandas del infrarrojo medio (ρ_{im}) (1.80 a 8.00 μm) e infrarrojo cercano (ρ_i) (0.70 a 0.13 μm) que se expresa como:

$$MSI = \frac{\rho_{im}}{\rho_i} \quad (2)$$

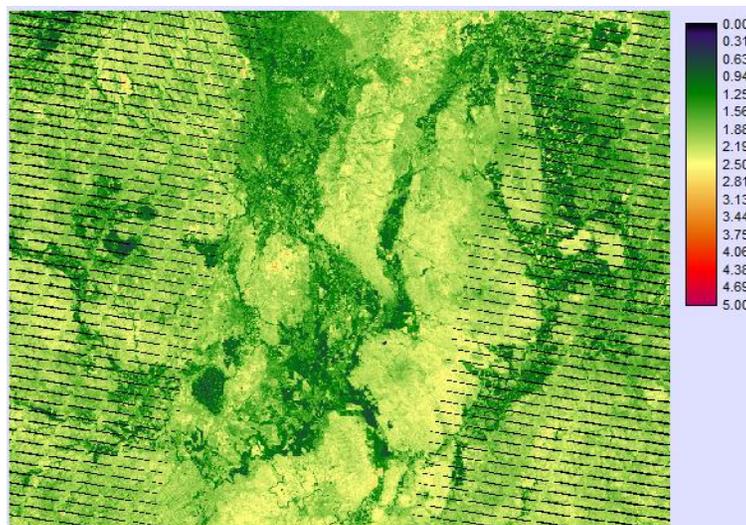


Figura 20. Imagen compuesta de MSI-Reflectancia Landsat 7 (21-10-08).

5.3.1.4. Relación NDVI-Kc.

Para estimar la evapotranspiración de un cultivo, se requiere conocer un coeficiente adimensional denominado Kc, FAO (1998), que puede obtenerse de la relación ET_c/ET_r , donde ET_c es la evapotranspiración del cultivo y ET_r la evapotranspiración de referencia. Este coeficiente representa la oferta de agua por la planta y el suelo. Por otra parte la evapotranspiración de referencia representa un índice de la demanda de agua por los factores climáticos. La oferta de agua por el suelo y por el cultivo depende de la disponibilidad de agua en el suelo y por la facilidad en la entrada y salida de agua de la planta, lo cual es función del desarrollo de la raíz y de las hojas, donde se encuentran las estomas, que es por donde sale el agua que transpira la planta.

Por otra parte, se han encontrado relaciones lineales entre el NDVI (que es un indicador del verdor de las hojas) y los valores medios del Kc para la estimación de la evapotranspiración de los cultivos que cubren todo el suelo como las gramíneas, Neale et al. (1989); D'Urso y Calera (2005), del tipo mostrado en (3):

$$K_c = 1.15 * NDVI + 0.17 \quad (3)$$

Luego si se dispone de datos sobre la evapotranspiración de referencia (ET_r), que se estima mediante la ecuación de Penman y Moneith, con las modificaciones de Allen (1986), dato generado por muchas de las estaciones meteorológicas automáticas, es posible calcular aproximadamente la evapotranspiración de estos cultivos (ET_c), con:

$$ET_c = K_c * ET_r \quad (4)$$

5.3.2. Actividades de campo.

Las actividades de campo se desarrollaron a partir del establecimiento del cultivo hasta la cosecha o zafra del mismo. Usualmente comienza desde mediados del mes de Noviembre, hasta finales de mayo. Las mediciones se realizaron en el ciclo agrícola 2009-2010.

5.3.2.1. Selección de parcelas.

Con el apoyo del personal del Campo Experimental del INIFAP, se seleccionarán 23 parcelas de seguimiento, de acuerdo a los siguientes criterios: Cultivo (caña de azúcar), ubicados dentro de la zona de abastecimiento del Ingenio Emiliano Zapata, de los cuales se tenga información de libreta de campo por parte de los productores cooperantes.

Cuadro 9. Descripción de las parcelas de control.

| NO | CULTIVO | PARCELA | CAMPO | NOMBRE DEL PRODUCTOR | SUPERFICIE (HA) |
|----|----------------|---------|-------|------------------------------|-----------------|
| 1 | Caña de azúcar | 12026 | 3102 | Zúñiga Flores Victoriano | 3.10 |
| 2 | Caña de azúcar | 1587 | 3307 | López Jaimes Rodrigo | 3.90 |
| 3 | Caña de azúcar | 23698 | 3313 | Olascoaga Plasencia Horacio | 3.30 |
| 4 | Caña de azúcar | 12391 | 3104 | Medrano Lima José Gabriel | 5.30 |
| 5 | Caña de azúcar | 11728 | 3325 | Ayestarán Valle Cecilio | 3.20 |
| 6 | Caña de azúcar | 13499 | 4322 | Miranda Rosas Felipe | 5.80 |
| 7 | Caña de azúcar | 13688 | 4314 | Miranda Velázquez Antonio | 4.30 |
| 8 | Caña de azúcar | 4356 | 1309 | Arias Hernández José Juan | 3.10 |
| 9 | Caña de azúcar | 12111 | 3107 | García Murga Demetrio | 3.00 |
| 10 | Caña de azúcar | 3435 | 4302 | Bahena Mondragón Ángel | 3.50 |
| 11 | Caña de azúcar | 9515 | 1109 | Morales Vázquez Israel | 3.20 |
| 12 | Caña de azúcar | 24575 | 3111 | Rodríguez Martínez Juan | 3.70 |
| 13 | Caña de azúcar | 20067 | 3313 | Flores Valle Eleonora Jazmín | 3.10 |
| 14 | Caña de azúcar | 23037 | 1130 | Valladares Pacheco Wilfrido | 5.40 |
| 15 | Caña de azúcar | 15336 | 1321 | Díaz Rangel Eduardo | 4.20 |
| 16 | Caña de azúcar | 20309 | 1307 | Rivera Ojeda Salvador | 6.50 |
| 17 | Caña de azúcar | 21218 | 1312 | Román Obispo Gloria | 3.10 |
| 18 | Caña de azúcar | 4283 | 1307 | Ayala Ocampo Amado | 4.10 |
| 19 | Caña de azúcar | 13424 | 4322 | Morales Rivas Jesús Enrique | 3.50 |
| 20 | Caña de azúcar | 3741 | 2141 | Cobrerros Beltrán David | 3.00 |
| 21 | Caña de azúcar | 21470 | 2131 | Fernández González Manuel H. | 4.40 |
| 22 | Caña de azúcar | 23071 | 3306 | Pizaña Ramírez Oscar | 3.70 |
| 23 | Caña de azúcar | 22371 | 3326 | Bastida Castillo Antonia | 3.80 |

5.3.2.2. Determinación del rendimiento.

Los valores de rendimiento de los cultivos de las parcelas de control fueron obtenidos en el momento de la comercialización de la cosecha, lo cual corresponde al pesaje obtenido a la entrega de la caña de azúcar al Ingenio.

5.3.3. Análisis de la información en gabinete.

5.3.3.1. Análisis de regresión de las variables.

En una hoja electrónica se obtendrá la relación funcional de las variables de estudio, determinándose el tipo de función, la función matemática, coeficiente de determinación y correlación, así como las gráficas que se presentarán en las Figuras en el capítulo de resultados y discusión. Los pares de variables analizados son los siguientes:

- NDVI vs Rendimiento,
- MSI vs Rendimiento,
- ETc vs Rendimiento.

5.3.3.2. Estimación del rendimiento del cultivo.

Con la función matemática que mejor se ajuste se podrá estimar el rendimiento de caña de azúcar de la zona de abastecimiento del Ingenio Emiliano Zapata.

6. RESULTADOS

Se describe a continuación los resultados obtenidos en el presente trabajo de investigación y un análisis de acuerdo a lo establecido en los objetivos.

6.1. INFORMACIÓN DE CAMPO.

6.1.1. Georeferenciación.

Cuadro 10. Georeferenciación de las parcelas de control.

| PARCELA | NOMBRE DEL PRODUCTOR | PUNTO | CENTROID X | CENTROID Y |
|---------|------------------------------|-------|--------------|---------------|
| 12026 | Zúñiga Flores Victoriano | P1 | 483885.80533 | 2058132.21828 |
| 1587 | López Jaimes Rodrigo | P2 | 487669.04427 | 2072015.85490 |
| 23698 | Olascoaga Plasencia Horacio | P3 | 482279.23010 | 2069126.07699 |
| 12391 | Medrano Lima José Gabriel | P4 | 483872.08412 | 2061187.14590 |
| 11728 | Ayestarán Valle Cecilio | P5 | 488557.28737 | 2075900.68972 |
| 13499 | Miranda Rosas Felipe | P6 | 478212.93132 | 2054483.82836 |
| 13688 | Miranda Velázquez Antonio | P7 | 476805.89042 | 2053296.74751 |
| 4356 | Arias Hernández José Juan | P8 | 481718.17373 | 2063559.19546 |
| 12111 | García Murga Demetrio | P9 | 485698.38248 | 2057579.37125 |
| 3435 | Bahena Mondragón Ángel | P10 | 481200.40364 | 2055344.51841 |
| 9515 | Morales Vázquez Israel | P11 | 481154.40831 | 2065077.55296 |
| 24575 | Rodríguez Martínez Juan | P12 | 493595.17349 | 2053945.43231 |
| 20067 | Flores Valle Eleonora Jazmín | P13 | 482156.64227 | 2068770.35565 |
| 23037 | Valladares Pacheco Wilfrido | P14 | 481913.96438 | 2060447.59351 |
| 15336 | Díaz Rangel Eduardo | P15 | 483023.40101 | 2064925.47882 |
| 20309 | Rivera Ojeda Salvador | P16 | 480277.42658 | 2060641.94309 |
| 21218 | Román Obispo Gloria | P17 | 481020.63461 | 2060503.33471 |
| 4283 | Ayala Ocampo Amado | P18 | 481510.98848 | 2059233.77250 |
| 13424 | Morales Rivas Jesús Enrique | P19 | 478976.90978 | 2055141.66855 |
| 3741 | Cobrerros Beltrán David | P20 | 483836.92171 | 2063637.83748 |
| 21470 | Fernández González Manuel H. | P21 | 490332.37000 | 2065938.12000 |
| 23071 | Pizaña Ramírez Oscar | P22 | 487912.62000 | 2069490.85000 |
| 22371 | Bastida Castillo Antonia | P23 | 487934.14000 | 2075504.78000 |

El Cuadro 10 y Figura 21 muestran las 23 parcelas seleccionadas y los puntos de control georeferenciados en el sistema de información geográfica; además de contarse con el apoyo del catastro de usuarios del distrito de riego 016 Estado de Morelos.

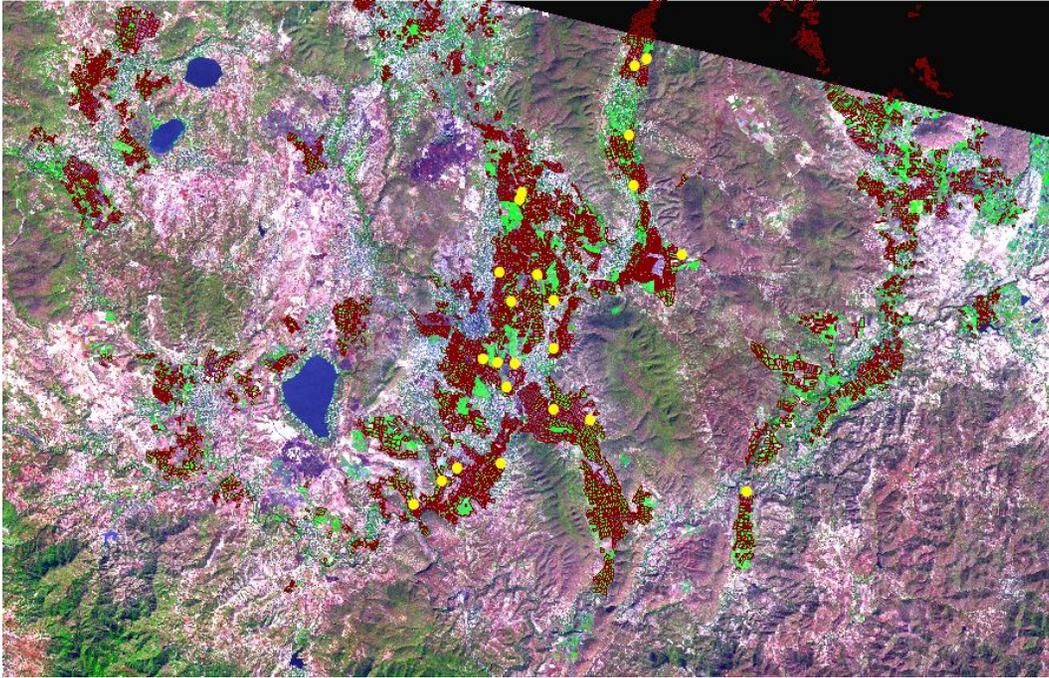


Figura 21. Localización de los puntos de control en la zona de abasto del Ingenio Emiliano Zapata.

6.2. ÍNDICE DE VEGETACIÓN.

6.2.1. Índice de vegetación de diferencias normalizadas (NDVI).

A partir de 30 imágenes del satélite Landsat 7ETM+ se calcularon para el mismo período (ciclo agrícola 2009-2010) los valores promedio de NDVI y MSI, para lo cual se utilizó el programa desarrollado por L. Palacios S. denominado “Parcelas”, que permite calcular el valor promedio de todos los píxeles ubicados dentro de los límites de una parcela en particular, definidos por sus vectores o “shapes”. Además de, ETC acumulado que se calculó utilizando la relación lineal propuesta por A. Calera y J. González (2006). Los resultados se presentan en el cuadro 11.

Cuadro 11. Valores calculados de ETc, NDVI y MSI.

| Id | Parcela | Area ha | Rend. (t/ha) | MSI (media) | NDVI (media) | ETr (mm) | ETc (mm) |
|-----------|----------------|----------------|---------------------|--------------------|---------------------|-----------------|-----------------|
| 1 | 12026 | 3.15 | 115.42 | 0.80426 | 0.36903 | 1227.9 | 863.53 |
| 2 | 1587 | 3.93 | 119.45 | 0.78329 | 0.38030 | 1145.2 | 858.26 |
| 3 | 23698 | 3.32 | 111.41 | 0.82038 | 0.34294 | 1164.1 | 787.02 |
| 4 | 12391 | 5.37 | 117.13 | 0.81049 | 0.36155 | 1273.8 | 879.89 |
| 5 | 11728 | 3.29 | 118.42 | 0.79879 | 0.36822 | 1427.3 | 961.19 |
| 6 | 13499 | 5.83 | 117.83 | 0.79794 | 0.36149 | 1250.4 | 880.63 |
| 7 | 13688 | 4.34 | 124.80 | 0.77357 | 0.38484 | 1297.6 | 915.48 |
| 8 | 4356 | 3.18 | 114.98 | 0.77030 | 0.37575 | 1328.5 | 923.58 |
| 9 | 12111 | 3.07 | 127.37 | 0.76205 | 0.42134 | 1492.1 | 1045.25 |
| 10 | 3435 | 3.53 | 124.62 | 0.76810 | 0.37896 | 1301.7 | 960.60 |
| 11 | 9515 | 3.29 | 110.57 | 0.82232 | 0.34917 | 1142.2 | 787.97 |
| 12 | 24575 | 3.72 | 97.43 | 0.84106 | 0.25724 | 930.2 | 557.92 |
| 13 | 20067 | 3.14 | 122.08 | 0.75035 | 0.38454 | 1250.4 | 895.27 |
| 14 | 23037 | 5.42 | 104.27 | 0.86847 | 0.28536 | 984.4 | 609.70 |
| 15 | 15336 | 4.26 | 110.11 | 0.80825 | 0.32225 | 1217.5 | 863.16 |
| 16 | 20309 | 6.51 | 113.19 | 0.81947 | 0.32615 | 1188.0 | 830.59 |
| 17 | 21218 | 3.13 | 95.89 | 0.88101 | 0.23933 | 934.5 | 603.49 |
| 18 | 4283 | 4.12 | 113.38 | 0.81071 | 0.33058 | 1179.0 | 817.91 |
| 19 | 13424 | 3.57 | 110.54 | 0.84415 | 0.31980 | 1140.7 | 771.67 |
| 20 | 3741 | 3.04 | 116.18 | 0.80018 | 0.34046 | 1306.3 | 921.44 |
| 21 | 21470 | 4.47 | 107.01 | 0.83891 | 0.30194 | 938.2 | 686.27 |
| 22 | 23071 | 3.71 | 113.30 | 0.77520 | 0.34599 | 1322.3 | 902.27 |
| 23 | 22371 | 3.86 | 123.45 | 0.74523 | 0.39713 | 1344.4 | 988.00 |

En la figura 22, se observa la variación de valores de NDVI obtenidos como promedio dentro de 5 parcelas de la zona estudio (mediante el mismo programa “Parcelas”). Se registran valores de NDVI entre -0.1 y 0.7, en similitud a lo reportado por autores como Knop (2007) y Rahman et al. (2004), para un dosel verde y totalmente desarrollado de caña de azúcar.

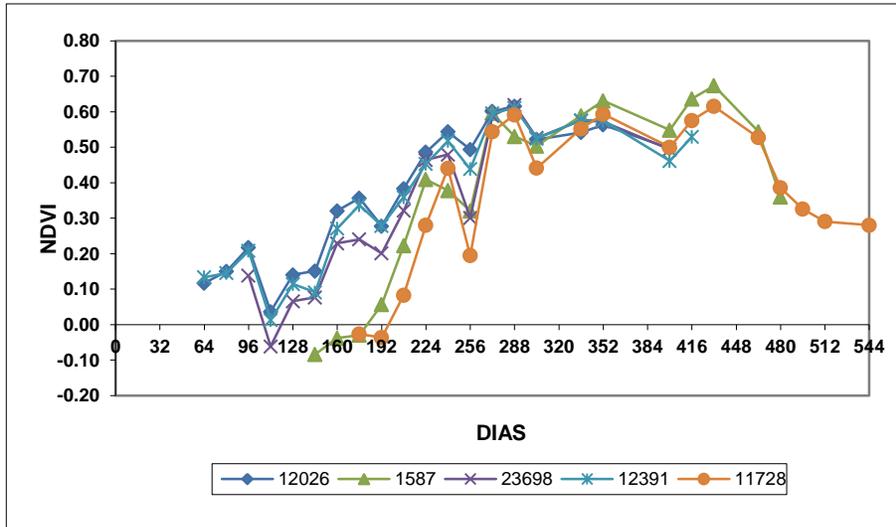


Figura 22. Variación de valores de NDVI en parcelas de la zona de estudio.

6.2.1.1. Relación funcional NDVI - Rendimiento.

Utilizando los datos del cuadro 11, se calcularon las correlaciones entre los valores promedio de NDVI, con el rendimiento obtenido en cada parcela de control. Figura 23.

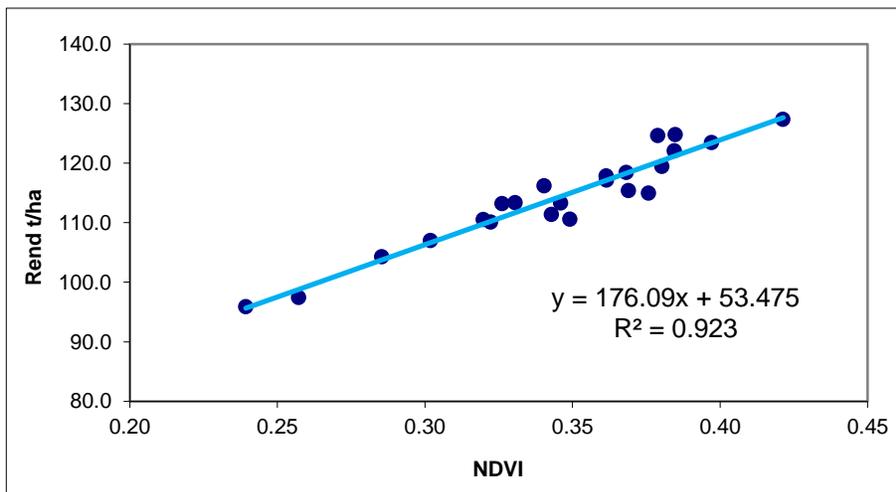


Figura 23. Regresión de las variables rendimiento y NDVI

La función obtenida que se muestra en la figura, ha sido $REND = 176.09 \text{ NDVI} + 53.475$ con un coeficiente de determinación de 0.923 y error estándar de 2.29. En este sentido, Simões et al. (2005) y Murillo et al. (2010) demostraron la alta correlación que existe entre productividad y biomasa con el NDVI, alcanzando un valor de r^2 de 0.88 y 0.83, respectivamente.

6.3. ÍNDICE DE ESTRÉS HÍDRICO.

6.3.1. Índice de estrés de humedad (MSI).

En la figura 24, se observa la variación de valores de MSI obtenidos como promedio dentro de 5 parcelas de la zona estudio (mediante el mismo programa “Parcelas”). Se registran valores de MSI entre 0.4 y 1.0, que indican una elevada condición de estrés en la planta.

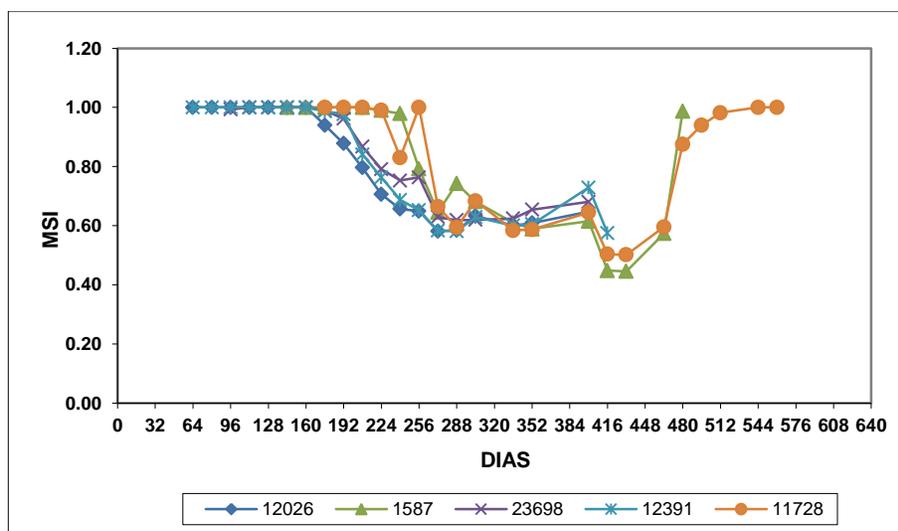


Figura 24. Variación de valores de MSI en parcelas de la zona de estudio.

6.3.1.1. Relación funcional MSI - Rendimiento.

La figura 25 representa la distribución de las variables de rendimiento y MSI calculado a partir de los valores promedio, y la línea de tendencia ajustada a la función lineal, así como la función matemática y el coeficiente de determinación.

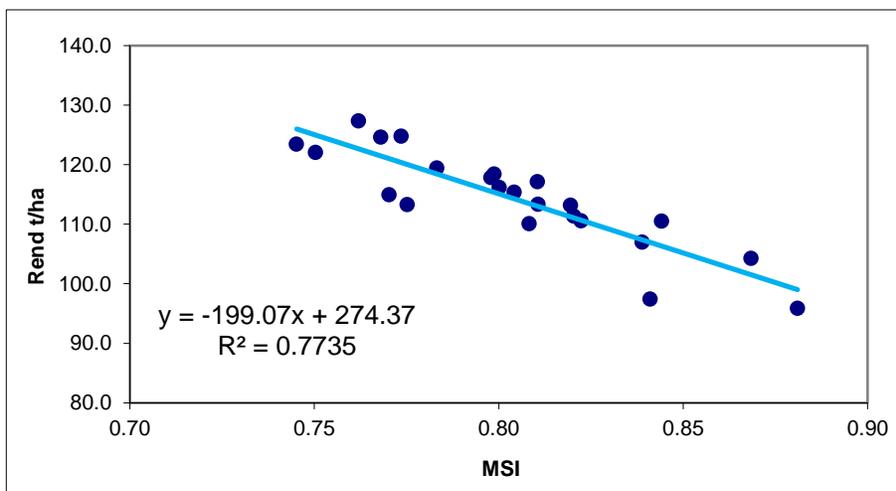


Figura 25. Regresión de las variables rendimiento y MSI

La función obtenida que se muestra en la figura, ha sido $REND = -199.07 MSI + 274.37$ con un coeficiente de determinación de 0.7735 y error estándar de 4.13.

En cuanto a la necesidad hídrica de la planta queda claro que, a medida que aumenta el estrés hídrico, disminuye en forma lineal el rendimiento.

6.4. EVAPOTRANSPIRACIÓN.

6.4.1. Evapotranspiración del cultivo (ETc).

Para verificar las relaciones entre el Kc y el NDVI en el ciclo agrícola 2009-2010, se muestra la estimación del consumo de agua de la caña de azúcar, en una parcela de la zona de estudio (número de cuenta: 12026). La evapotranspiración de referencia se obtuvo de la estación agrometeorológica INIFAP, que corresponde al valor diario acumulado entre fechas Landsat y el Kc mediante la función propuesta por A. Calera y J. González (2006) cuya relación es $Kc = 1.15 NDVI + 0.17$, con valores de NDVI calculados de las imágenes Landsat, en el mismo lapso de tiempo.

Los resultados de las mediciones se muestran en el cuadro 12:

Cuadro 12. Cálculo de Kc a partir de valores de NDVI

| DIAS | DIFERENCIA | NDVI | ETr (mm) | Kc estimado | ETc (mm) |
|------|------------|---------|----------|-------------|----------|
| 16 | 16 | 0.21747 | 63.8 | 0.420 | 26.8 |
| 32 | 16 | 0.32047 | 96.3 | 0.539 | 51.9 |
| 48 | 16 | 0.35625 | 90.1 | 0.580 | 52.2 |
| 64 | 16 | 0.27756 | 83.4 | 0.489 | 40.8 |
| 80 | 16 | 0.38324 | 69.5 | 0.611 | 42.4 |
| 96 | 16 | 0.48594 | 72.7 | 0.729 | 53.0 |
| 112 | 16 | 0.54334 | 62.6 | 0.795 | 49.8 |
| 128 | 16 | 0.49367 | 64.8 | 0.738 | 47.8 |
| 144 | 16 | 0.60085 | 74.5 | 0.861 | 64.1 |
| 160 | 16 | 0.61549 | 83.7 | 0.878 | 73.5 |
| 176 | 16 | 0.52198 | 85.2 | 0.770 | 65.6 |
| 208 | 32 | 0.54169 | 144.3 | 0.793 | 114.4 |
| 224 | 16 | 0.56296 | 72.6 | 0.817 | 59.3 |
| 272 | 48 | 0.49662 | 164.4 | 0.741 | 121.8 |

6.4.1.1. Relación funcional ETc - Rendimiento.

Se calcularon las correlaciones entre los valores acumulados de ETc - Rendimiento. De donde se observa que a medida que aumenta la evapotranspiración, se espera más fotosíntesis y, en consecuencia, más biomasa y rendimiento de caña de azúcar (Figura 26).

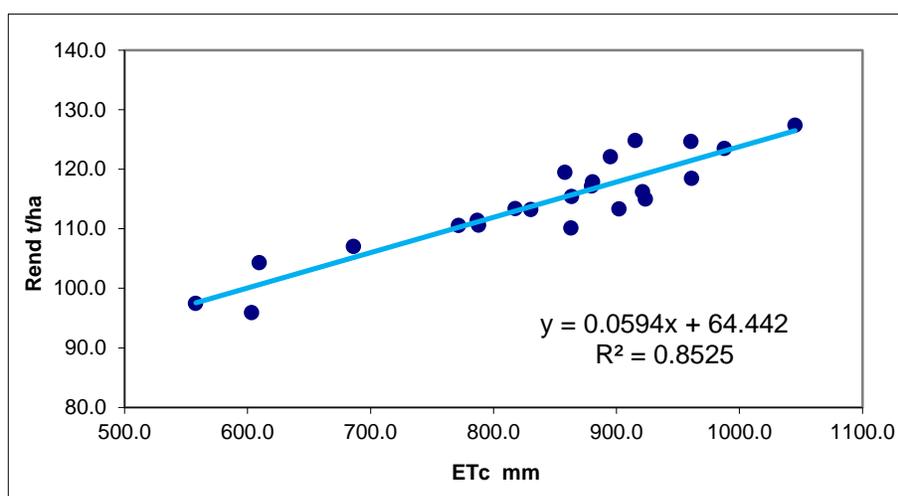


Figura 26. Regresión de las variables rendimiento y ETc.

La función obtenida que se muestra en la figura, ha sido $REND = 0.0594 NDVI + 64.442$ con un coeficiente de determinación de 0.8525 y error estándar de 3.25.

6.5. RENDIMIENTO.

Los valores de NDVI y MSI de una parcela de control corresponden a la media de todos los píxeles incluidos dentro de la parcela, puesto que el rendimiento corresponde a la parcela completa.

De esta forma se estimó dado el modelo de mejor ajuste, que el rendimiento promedio en la zona de estudio es de 114.3 t ha⁻¹. La Secretaría de Agricultura a través del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, SIAP (2009), indicó que el rendimiento promedio de caña de azúcar reportado en campo en el estado de Morelos en el periodo 1998-2008 es de 113.5 t ha⁻¹ y, particularmente en el año 2009, éste es de 115.4 t ha⁻¹, por lo que se considera que los resultados obtenidos se encuentran dentro de un buen rango de estimación.

Cabe mencionar que el valor de la superficie cosechada de caña de azúcar en el ciclo 2009-2010 fue de 10,664 ha (base de datos de SIG del Ingenio). Ellos reportan para dicha superficie un volumen de producción de 1, 154,035 ton al cierre de la zafra. Este valor al ser comparado con el estimado del modelo de predicción de 1, 219,047 ton, indica que hubo una sobreestimación del 5.3 % que equivalen a 65,012 ton, lo que permite conocer la efectividad de las predicciones de rendimiento realizadas en este estudio.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha logrado una estimación de rendimiento de caña de azúcar a partir de una función exponencial que requiere como dato de entrada valores del índice de vegetación NDVI, índice de estrés de humedad (MSI) y de evapotranspiración del cultivo (ETc). Se ha observado una relación directa entre el rendimiento de caña de azúcar y los mencionados índices (estimados a partir de imágenes Landsat 7 ETM+). Las variaciones de los índices reproducen adecuadamente los cambios en el rendimiento de caña de azúcar.

El uso combinado de imágenes satelitales con información meteorológica y Sistemas de Información Geográfica, permite a los usuarios de los sistemas de riego, estimar el consumo de agua de sus cultivos, evaluar la eficiencia de aplicación del agua y estimar en forma aproximada el rendimiento futuro.

El trabajo destaca la utilidad de las imágenes de satélite de resolución espacial de 30 m por 30 m. Dicha resolución es la apropiada para su uso en agricultura de precisión en parcelas que excedan las 2 ha de extensión, particularmente en la determinación de rendimiento.

Finalmente, se considera que la determinación temprana de rendimientos de cultivos debe ser el comienzo de una serie de técnicas a desarrollar por un emprendimiento agropecuario, para lograr un adecuado conocimiento de los ambientes y un manejo integrado de los cultivos. De esta forma se genera información base que puede aplicarse en la planificación y manejo de la producción agropecuaria en busca de dar respuestas a la productividad y competitividad presentes en el sector.

7.2. RECOMENDACIONES

En las seis regiones cañeras del país, es posible obtener imágenes del satélite Landsat cada 16 días, por lo que los índices NDVI y MSI podrían ser calculados para conocer el estado de los cultivos, principalmente por los productores de caña de azúcar.

Utilizando el programa Parcelas ®, desarrollado por L. S. Palacios, se pueden calcular los índices promedio para cada parcela en el área de influencia de los ingenios del país, si los vectores de las parcelas (*. Shp) del Sistema de Información Geográfica (SIG) están disponibles, así como la imagen correspondiente de índices obtenido mediante el programa IDRISI ®. Los resultados del programa "Parcelas" se guardan en un formato (*. Csv) que se pueden abrir fácilmente con Excel ® y También se podría añadir a una base de datos SIG.

Es posible generar gráficos con esta información, mediante el uso de un programa como ArcView o ArcMap de ESRI ®, que muestra los valores de los índices de cada 16 días y como están creciendo los cultivos (si las imágenes están disponibles). La información derivada es indispensable como una herramienta de orientación en la planificación de la producción agrícola.

8. AGRADECIMIENTOS

A los agricultores cooperantes de las parcelas piloto de caña de azúcar, así como a los encargados de la estación agrometeorológica "INIFAP". A todos ellos nuestro agradecimiento. Al CONACYT por financiar el proyecto de investigación, del cual este artículo forma parte.

9. LITERATURA CITADA

- Abdel R. a F. B. Ahmed. 2008. The application of remote sensing techniques to sugarcane (*Saccharum spp. hybrid*) production: a review of the literature. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 29, no. 13, pp. 3753-3763.
- Aguilar N., G. Galindo, J. Fortanelli y C. Contreras. Índice normalizado de vegetación en caña de azúcar en la Huasteca Potosina. *Avances en investigación agropecuaria*, vol. 14, pp. 49-65.
- Allen R.G. 1986. A Penman for all seasons. *Journal of irrigation and drainage engineering*, ASCE, 111(4): 348-368.
- Almeida T.I.R., C.R. de Souza Filho y R. Rossetto. 2006. 'ASTER and Landsat ETM+ images applied to sugarcane yield forecast'. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 27, no. 19, pp. 4057-4069.
- Apan A., A. Held, S. Phinn y J. Markley. 2004. 'Spectral discrimination and classification of sugarcane varieties using EO-1 Hyperion hyperspectral imagery'. En *Proceedings of the 25th Asian Conference on Remote Sensing*, Chaing Mai, Thailand. http://www.gisdevelopment.net/aars/acrs/2004/hyper/acrs2004_a1001.asp. [Accesado en mayo 2010].
- Begue A., P. Todoroff y J. Pater. 2008. Multi-time scale analysis of sugarcane within-field variability: improved crop diagnosis using satellite time series? *Precision Agric.* vol. 9, no. 3, pp. 161-171.
- Calera B. A. y J. González. 2006. Parámetros biofísicos de la cubierta vegetal. Relaciones operativas para la obtención de mapas de estos parámetros de las imágenes de satélite. Grupo de Teledetección y SIG, IDR, UCLM. Documento de PLEIADeS.
- D'Urso G. y A. Calera. 2005. Operative approaches to determine crop water requirements from earth observation data: methodologies and applications. *Earth observation for monitoring and water management*. AIP conference proceedings. Naples, Italy.
- Elmorea, A. J., N. J. Xun Shib, Gorenceb, Xia Lic, F. Haiming Jind, Wangc y Xiaohao Zhange. 2008. Spatial distribution of agricultural residue from rice for potential biofuel production in China. *Biomass and Bioenergy*, vol. 32, no. 1, pp. 22-27.
- Epiphanyo, J. C. N., J. M. Gleriani, A. R. Formaggio, B. F. Rudorff y Theodor. 1996. Índices de vegetação no sensoriamento remoto da cultura do feijão. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, vol. 31, no. 6, pp. 445-454.
- Fortes C. y J.A.M. Demattée. 2006. Discrimination of sugarcane varieties using Landsat 7 ETM+ spectral data. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 27, no. 7, pp. 395-412.

- Fundación Produce, Morelos. 2008-2010. Sistema de Información Agroclimática. En la WEB www.clima.inifap.gob.mx.
- Galvão L.S., A.R. Formaggio y D.A. Tisot. 2005. 'Discrimination of sugarcane varieties in Southeastern Brazil with EO-1 Hyperion data'. *Remote Sensing of Environment*, vol. 94, pp. 523-534.
- Galvão L.S., A.R. Formaggio y D.A. Tisot. 2006. 'The influence of spectral resolution on discriminating Brazilian sugarcane varieties'. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 24, pp. 769-777.
- García E. 1987. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen, para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana. 4ª ed. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- Gers C.J. 2003. 'Remotely sensed sugarcane phenological characteristics at Umfolozi South Africa'. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003, IGARSS '03, Proceedings, IEEE International*, vol. 2, pp. 1010-1012.
- Hatfield J. L. 2008. Application of Spectral Remote Sensing for Agronomic Decisions. *Agronomy Journal*, vol. 100, pp. 117-131.
- Inman-Bamber N. G. y D. M. Smith. 2005. Water relations in sugarcane and response to waters deficits. *Fields Crops Research, Australia*, vol. 92, pp. 185-202.
- Jensen R. J. 2000. *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective*. Prentice Hall, New Jersey.
- Ji-hua, M. and 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 (Consultado el 11 de marzo de 2010).
- Johnson A.K.L. y 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*, vol. 19, pp. 237-245.
- Johnson R.M., R.P. Viator, J.C. Veremis, E.P. Richard Jr. y P.V. Zimba. 2005. 'Discrimination of sugarcane varieties with hyperspectral reflectance measurements and plant pigment analysis'. *Journal of the American Society of Sugar Cane Technologists*, vol. 25.
- Krishna Rao P. V. 2002. Remote sensing: A technology for assessment of sugarcane crop acreage and yield. *Sugartech*, vol. 4, pp. 97-101.
- Murillo P.J., J.A. Carbonell, C.A. Osorio y E. Bastidas. 2006. 'Clasificación de las variedades CC 85-92 y CC 84-75 usando imágenes satelitales Landsat 7 ETM+'. VII Congreso de la Asociación Colombiana de Técnicos de la Caña de Azúcar, Técnicaña, 2006, vol. 1, pp. 275-284.

- Murillo P.J., C.A. Osorio, J.A. Carbonell y A.E. Palma. 2010. Monitoring sugarcane crops in the Cauca river valley (Colombia), using MODIS satellite images. Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technology, vol. 27, pp. 1-5.
- Narciso G. y E. Schmidt. 1999. 'Identification and classification of sugarcane based on satellite remote sensing'. Proceedings of the South African Sugar Technologists' Association, vol. 73, pp. 189-194.
- Nowatzki J. y R. Andrés. 2004. 'Agricultural remote sensing basics'. Disponible: <http://www.ag.ndsu.edu/pubs/ageng/gis/ae1262w.htm>. [Accesado en mayo 2010].
- Palacios S. L. A. 2007. Corrector Atmosférico en Imágenes Landsat. Tesis Doctoral en el COLPOS.
- Rudorff B. y G. Batista. 1990. Yield estimation of sugarcane based on agrometeorological-spectral models. Remote Sensing of Environment, vol. 33, pp. 183-192.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). 2009. Descripción de la cadena agroalimentaria de caña de azúcar. Secretaria de Agricultura Pesca y Alimentación SAGARPA. México.
- Schmidt E.J., G. Narciso, P. Frost y C.J. Gers. 2000. 'Application of remote sensing technology in the South African sugar industry: a review of recent research findings'. Proceedings of the South African Sugar Technologists' Association, vol. 74, pp. 192-201.
- Simões M.D.S., J.V. Rocha y R.A. Lamparelli. 2003. Análise do comportamento espectral de uma área comercial de cana-de-açúcar em duas zafras por meio de radiometria de campo. En: Anais XI SBSR, Belo Horizonte, Brasil, INPE, pp.2367-2374.
- Simões M., J. Rocha y R.A. Lamparelli. 2005. Spectral variables, growth analysis and yield of sugarcane. Scientia Agricola (Piracicaba, Brazil), vol. 62, no. 3, pp. 199-207.
- Soria R. J. 2004. Methodology for prediction of corn yield using remote sensing satellite data in Central Mexico, Boletín Instituto de Geografía, UNAM, vol. 55, pp. 61-78.
- Ueno M., Y. Kawamitsu y K. Maeda. 2005. Combined applications of NIR, RS, and GIS for sustainable sugarcane production. Sugarcane international, vol. 23, pp. 8-11.
- USGS, Global Visualization Viewer, disponible online en: <http://glovis.usgs.gov/>.
- Xavier A.C., B.F.T. Rudorff, Y.E. Shimabukuro, L.M.S. Berka y M.A. Moreira. 2006. 'Multi-temporal analysis of MODIS data to classify sugarcane crop'. International Journal of Remote Sensing, vol. 27, no. 4, pp. 755-768.
- Zhang P. y B. Anderson. 2005. Potential monitoring of crop production using a satellite-based Climate-Variability Impact Index. Agricultural and Forest Meteorology, vol. 132, pp. 344-358.

10. ANEXO

- 1. VALORES MEDIDOS DE NDVI EN LAS 23 PARCELAS DE CONTROL.**
- 2. VALORES MEDIDOS DE MSI EN LAS 23 PARCELAS DE CONTROL.**
- 3. VALORES MEDIDOS DE ET_c EN LAS 23 PARCELAS DE CONTROL.**

Valores medidos de NDVI en las 23 parcelas de control (Fechas Landsat).

| ID | PARC | 16 | 32 | 48 | 64 | 80 | 96 | 112 | 128 | 144 | 160 | 176 | 192 | 208 | 224 | 240 |
|----|-------|---------|----------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|---------|---------|
| 1 | 12026 | | | | 0.11681 | 0.14987 | 0.21747 | 0.03606 | 0.14048 | 0.15086 | 0.32047 | 0.35625 | 0.27756 | 0.38324 | 0.48594 | 0.54334 |
| 2 | 1587 | | | | | | | | | -0.08399 | -0.03813 | -0.02987 | 0.05630 | 0.22296 | 0.40899 | 0.37810 |
| 3 | 23698 | | | | | | 0.13796 | -0.06171 | 0.06588 | 0.07674 | 0.22891 | 0.24050 | 0.20064 | 0.32104 | 0.46412 | 0.47949 |
| 4 | 12391 | | | | 0.13351 | 0.14510 | 0.20816 | 0.01228 | 0.11428 | 0.09108 | 0.27078 | 0.33665 | 0.27840 | 0.35927 | 0.45293 | 0.51739 |
| 5 | 11728 | | | | | | | | | | | -0.02643 | -0.03694 | 0.08288 | 0.28004 | 0.44076 |
| 6 | 13499 | | | | 0.14751 | 0.11858 | 0.16087 | -0.02836 | 0.08502 | 0.09628 | 0.24553 | 0.31016 | 0.23060 | 0.40185 | 0.51046 | 0.51227 |
| 7 | 13688 | | | | | 0.21947 | 0.13596 | -0.05782 | 0.09507 | 0.13224 | 0.27077 | 0.29745 | 0.21645 | 0.36265 | 0.51257 | 0.50752 |
| 8 | 4356 | | | | | | | | | | 0.28811 | -0.10299 | -0.10458 | 0.03247 | 0.24469 | 0.38225 |
| 9 | 12111 | | | | | | | | | | | | -0.01705 | 0.06912 | 0.28900 | 0.39131 |
| 10 | 3435 | | | | | | | -0.07759 | -0.04112 | 0.00943 | 0.14750 | 0.18526 | 0.17853 | 0.33121 | 0.46509 | 0.50964 |
| 11 | 9515 | | | | 0.12045 | 0.14614 | 0.25539 | 0.02384 | 0.24030 | 0.19707 | 0.39723 | 0.32642 | 0.27929 | 0.40989 | 0.51354 | 0.52060 |
| 12 | 24575 | | | | | 0.15262 | 0.18180 | -0.04388 | 0.06332 | 0.08976 | 0.22917 | 0.26413 | 0.20053 | 0.15366 | 0.22087 | 0.30127 |
| 13 | 20067 | | | | | | 0.13309 | -0.08265 | 0.02427 | 0.02850 | 0.21123 | 0.26578 | 0.24849 | 0.36700 | 0.48664 | 0.53939 |
| 14 | 23037 | | | | 0.16544 | 0.14657 | 0.19294 | 0.02569 | 0.18254 | 0.08350 | 0.17819 | 0.20685 | 0.15698 | 0.27223 | 0.41274 | 0.40314 |
| 15 | 15336 | | | | 0.17969 | 0.17232 | 0.19320 | -0.03734 | 0.05808 | 0.07312 | 0.12985 | 0.06252 | -0.02137 | 0.27332 | 0.35706 | 0.35889 |
| 16 | 20309 | 0.11545 | -0.00249 | 0.17982 | 0.14411 | 0.16178 | 0.33116 | 0.10735 | 0.19820 | 0.22535 | 0.37730 | 0.12470 | 0.13154 | 0.29490 | 0.45650 | 0.46525 |
| 17 | 21218 | 0.07746 | 0.00880 | 0.19420 | 0.16876 | 0.16303 | 0.23883 | -0.01947 | 0.09739 | 0.08617 | 0.08110 | 0.07974 | 0.06382 | 0.17024 | 0.37038 | 0.39332 |
| 18 | 4283 | | | 0.15347 | 0.11312 | 0.12995 | 0.23300 | 0.08489 | 0.26469 | -0.01112 | 0.20999 | 0.09133 | 0.11263 | 0.22416 | 0.40726 | 0.52128 |
| 19 | 13424 | | | | 0.16510 | 0.14807 | 0.23436 | -0.06217 | 0.01245 | 0.07624 | 0.22675 | 0.10283 | 0.17259 | 0.43551 | 0.53102 | 0.37881 |
| 20 | 3741 | | | | 0.24038 | 0.21623 | 0.21763 | -0.01242 | 0.09257 | 0.04921 | 0.15116 | 0.05275 | 0.07114 | 0.17124 | 0.33831 | 0.35580 |
| 21 | 21470 | | | | | | | 0.00212 | 0.10778 | 0.10834 | 0.12802 | 0.09358 | -0.04647 | 0.03653 | 0.13758 | 0.21426 |
| 22 | 23071 | | | | | | | 0.01808 | 0.02686 | -0.00602 | 0.09790 | 0.20094 | 0.09834 | 0.18501 | 0.29747 | 0.36653 |
| 23 | 22371 | | | | | | | | | | | -0.07413 | -0.05724 | 0.08858 | 0.25287 | 0.42271 |

Valores medidos de NDVI en las 23 parcelas de control (Fechas Landsat) (continuación).

| 256 | 272 | 288 | 304 | 336 | 352 | 400 | 416 | 432 | 464 | 480 | 496 | 512 | 544 | 560 | MEDIA | Área ha | Rend. t/ha |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|------------|
| 0.49367 | 0.60085 | 0.61549 | 0.52198 | 0.54169 | 0.56296 | 0.49662 | | | | | | | | | 0.36903 | 3.14989 | 115.42 |
| 0.32072 | 0.59562 | 0.53038 | 0.50369 | 0.58859 | 0.63072 | 0.54828 | 0.63619 | 0.67362 | 0.54371 | 0.35951 | | | | | 0.38030 | 3.93365 | 119.45 |
| 0.30099 | 0.58868 | 0.61910 | 0.52641 | 0.57543 | 0.57208 | 0.49372 | | | | | | | | | 0.34294 | 3.31537 | 111.41 |
| 0.43841 | 0.59534 | 0.61128 | 0.52423 | 0.57614 | 0.57522 | 0.46141 | 0.52907 | | | | | | | | 0.36155 | 5.36972 | 117.13 |
| 0.19467 | 0.54406 | 0.59138 | 0.44119 | 0.55190 | 0.59306 | 0.50007 | 0.57510 | 0.61517 | 0.52716 | 0.38561 | 0.32602 | 0.29068 | 0.28004 | 0.20805 | 0.36822 | 3.28793 | 118.42 |
| 0.38118 | 0.56081 | 0.55886 | 0.46369 | 0.58200 | 0.58972 | 0.50835 | 0.57587 | 0.57996 | | | | | | | 0.36149 | 5.82766 | 117.83 |
| 0.42331 | 0.60101 | 0.61862 | 0.38406 | 0.59965 | 0.61094 | 0.53444 | 0.63378 | 0.59869 | | | | | | | 0.38484 | 4.34381 | 124.80 |
| 0.35697 | 0.56191 | 0.58541 | 0.27330 | 0.57237 | 0.59689 | 0.48365 | 0.58908 | 0.63986 | 0.56425 | 0.47140 | 0.41343 | 0.29084 | | | 0.37575 | 3.17633 | 114.98 |
| 0.39473 | 0.54947 | 0.59030 | 0.56999 | 0.58249 | 0.59762 | 0.53842 | 0.61290 | 0.68517 | 0.35635 | 0.37609 | 0.42798 | 0.36556 | 0.35193 | 0.27407 | 0.42134 | 3.06879 | 127.37 |
| 0.35930 | 0.59093 | 0.62502 | 0.52186 | 0.59087 | 0.57721 | 0.52825 | 0.62962 | 0.65486 | 0.33269 | 0.47470 | 0.44140 | 0.30238 | | | 0.37896 | 3.53166 | 124.62 |
| 0.24604 | 0.62591 | 0.61124 | 0.54784 | 0.61669 | 0.58366 | -0.02731 | | | | | | | | | 0.34917 | 3.28806 | 110.57 |
| 0.38909 | 0.35257 | 0.53121 | 0.44741 | 0.53133 | 0.54267 | 0.02282 | | | | | | | | | 0.25724 | 3.71514 | 97.43 |
| 0.35229 | 0.62114 | 0.64531 | 0.55541 | 0.59711 | 0.60515 | 0.49266 | 0.61017 | 0.60527 | | | | | | | 0.38454 | 3.14174 | 122.08 |
| 0.38978 | 0.49096 | 0.50646 | 0.26345 | 0.48301 | 0.50242 | 0.35896 | | | | | | | | | 0.28536 | 5.42063 | 104.27 |
| 0.36875 | 0.56659 | 0.53851 | 0.49628 | 0.56975 | 0.55474 | 0.48797 | 0.59180 | 0.60078 | 0.50792 | 0.37656 | 0.27505 | | | | 0.32225 | 4.26096 | 110.11 |
| 0.48720 | 0.56646 | 0.59323 | 0.51528 | 0.56666 | 0.40740 | 0.50242 | 0.55195 | | | | | | | | 0.32615 | 6.50827 | 113.19 |
| 0.44883 | 0.50125 | 0.53087 | 0.48860 | 0.52597 | 0.45539 | 0.26193 | 0.33414 | 0.12725 | 0.13534 | | | | | | 0.23933 | 3.12856 | 95.89 |
| 0.51958 | 0.61058 | 0.60954 | 0.48319 | 0.56465 | 0.56426 | 0.51440 | 0.54124 | | | | | | | | 0.33058 | 4.11663 | 113.38 |
| 0.23895 | 0.51069 | 0.53355 | 0.45676 | 0.52734 | 0.50850 | 0.47493 | 0.48462 | 0.55889 | | | | | | | 0.31980 | 3.56825 | 110.54 |
| 0.36909 | 0.51321 | 0.54472 | 0.49701 | 0.56222 | 0.55550 | 0.52372 | 0.58147 | 0.64750 | 0.54616 | 0.47687 | 0.40946 | | | | 0.34046 | 3.04286 | 116.18 |
| 0.12957 | 0.42303 | 0.45375 | 0.47108 | 0.53711 | 0.58997 | 0.50239 | 0.56996 | 0.62213 | 0.52347 | 0.43452 | | | | | 0.30194 | 4.46790 | 107.01 |
| 0.41691 | 0.56540 | 0.54750 | 0.46419 | 0.46788 | 0.50283 | 0.45767 | 0.56029 | 0.60409 | 0.55243 | 0.43442 | 0.39377 | 0.35939 | | | 0.34599 | 3.71064 | 113.30 |
| 0.17452 | 0.61576 | 0.61428 | 0.46077 | 0.58599 | 0.64432 | 0.56769 | 0.67412 | 0.73216 | 0.60486 | 0.45403 | 0.41432 | 0.32574 | 0.25972 | 0.18148 | 0.39713 | 3.86357 | 123.45 |

Valores medidos de MSI en las 23 parcelas de control (Fechas Landsat).

| ID | PARC | 16 | 32 | 48 | 64 | 80 | 96 | 112 | 128 | 144 | 160 | 176 | 192 | 208 | 224 | 240 |
|----|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1 | 12026 | | | | 1.00000 | 1.00000 | 1.00000 | 1.00000 | 1.00000 | 1.00000 | 1.00000 | 0.94001 | 0.87816 | 0.79639 | 0.70579 | 0.65641 |
| 2 | 1587 | | | | | | | | | 1.00000 | 1.00000 | 1.00000 | 1.00000 | 1.00000 | 0.98990 | 0.97943 |
| 3 | 23698 | | | | | | 0.99326 | 1.00000 | 1.00000 | 1.00000 | 1.00000 | 0.98972 | 0.96215 | 0.86740 | 0.79082 | 0.75263 |
| 4 | 12391 | | | | 1.00000 | 1.00000 | 1.00000 | 1.00000 | 1.00000 | 1.00000 | 1.00000 | 0.98682 | 0.97745 | 0.84118 | 0.76308 | 0.68687 |
| 5 | 11728 | | | | | | | | | | | 1.00000 | 1.00000 | 1.00000 | 0.98997 | 0.83018 |
| 6 | 13499 | | | | 1.00000 | 1.00000 | 0.96534 | 1.00000 | 1.00000 | 1.00000 | 1.00000 | 0.99524 | 0.96324 | 0.79156 | 0.68429 | 0.71579 |
| 7 | 13688 | | | | | 0.96837 | 1.00000 | 1.00000 | 1.00000 | 1.00000 | 1.00000 | 1.00000 | 1.00000 | 0.83045 | 0.69378 | 0.72685 |
| 8 | 4356 | | | | | | | | | | 0.90915 | 1.00000 | 1.00000 | 1.00000 | 0.94578 | 0.84372 |
| 9 | 12111 | | | | | | | | | | | | 1.00000 | 0.98880 | 0.98119 | 0.91892 |
| 10 | 3435 | | | | | | | 1.00000 | 1.00000 | 1.00000 | 1.00000 | 1.00000 | 1.00000 | 0.91654 | 0.70701 | 0.73363 |
| 11 | 9515 | | | | 1.00000 | 1.00000 | 0.99561 | 1.00000 | 1.00000 | 1.00000 | 0.91573 | 0.93383 | 0.86766 | 0.75086 | 0.67502 | 0.69463 |
| 12 | 24575 | | | | | 1.00000 | 0.95879 | 1.00000 | 1.00000 | 1.00000 | 0.99413 | 0.96693 | 0.94602 | 0.59356 | 0.79575 | 0.59033 |
| 13 | 20067 | | | | | | 1.00000 | 1.00000 | 1.00000 | 1.00000 | 1.00000 | 0.98087 | 0.95651 | 0.80983 | 0.71638 | 0.67528 |
| 14 | 23037 | | | | 0.99309 | 0.99232 | 0.98463 | 1.00000 | 1.00000 | 1.00000 | 0.99524 | 0.99316 | 0.99287 | 0.89347 | 0.76121 | 0.78982 |
| 15 | 15336 | | | | 0.89988 | 0.85964 | 0.87294 | 0.99618 | 0.99782 | 1.00000 | 1.00000 | 1.00000 | 1.00000 | 0.91968 | 0.89023 | 0.88464 |
| 16 | 20309 | 1.00000 | 1.00000 | 0.81101 | 0.97614 | 0.93543 | 0.77228 | 0.99829 | 1.00000 | 0.98270 | 0.90662 | 1.00000 | 0.99718 | 0.87167 | 0.74554 | 0.76247 |
| 17 | 21218 | 0.99261 | 0.99247 | 0.72929 | 0.90569 | 0.87503 | 0.83705 | 1.00000 | 0.99369 | 1.00000 | 0.99566 | 1.00000 | 1.00000 | 0.94738 | 0.84024 | 0.82927 |
| 18 | 4283 | | | 0.80638 | 0.99546 | 0.98523 | 0.89334 | 1.00000 | 1.00000 | 1.00000 | 1.00000 | 1.00000 | 1.00000 | 0.99738 | 0.79782 | 0.71619 |
| 19 | 13424 | | | | 0.98818 | 0.99742 | 0.94183 | 1.00000 | 1.00000 | 1.00000 | 1.00000 | 1.00000 | 0.99691 | 0.78953 | 0.69579 | 0.93540 |
| 20 | 3741 | | | | 0.91247 | 0.93945 | 0.93907 | 0.99698 | 0.99684 | 0.98859 | 1.00000 | 1.00000 | 1.00000 | 1.00000 | 0.94414 | 0.89159 |
| 21 | 21470 | | | | | | | 1.00000 | 1.00000 | 1.00000 | 1.00000 | 1.00000 | 1.00000 | 1.00000 | 1.00000 | 0.97330 |
| 22 | 23071 | | | | | | | 1.00000 | 0.99733 | 1.00000 | 0.99750 | 1.00000 | 1.00000 | 0.99039 | 0.79406 | 0.86083 |
| 23 | 22371 | | | | | | | | | | | 1.00000 | 1.00000 | 1.00000 | 0.96848 | 0.84775 |

Valores medidos de MSI en las 23 parcelas de control (Fechas Landsat) (continuación).

| 256 | 272 | 288 | 304 | 336 | 352 | 400 | 416 | 432 | 464 | 480 | 496 | 512 | 544 | 560 | MEDIA | Área ha | Rend. t/ha |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|------------|
| 0.64954 | 0.58142 | 0.58416 | 0.63247 | 0.59999 | 0.60922 | 0.64734 | | | | | | | | | 0.80426 | 3.14989 | 115.42 |
| 0.79268 | 0.64485 | 0.74239 | 0.68117 | 0.60969 | 0.58930 | 0.61503 | 0.44840 | 0.44550 | 0.57366 | 0.98713 | | | | | 0.78329 | 3.93365 | 119.45 |
| 0.76344 | 0.62977 | 0.61867 | 0.61956 | 0.62409 | 0.65448 | 0.68055 | | | | | | | | | 0.82038 | 3.31537 | 111.41 |
| 0.65188 | 0.58312 | 0.58181 | 0.62883 | 0.60055 | 0.60487 | 0.72892 | 0.57451 | | | | | | | | 0.81049 | 5.36972 | 117.13 |
| 1.00000 | 0.66439 | 0.59472 | 0.68394 | 0.58363 | 0.58690 | 0.64474 | 0.50358 | 0.50134 | 0.59538 | 0.87524 | 0.93991 | 0.98194 | 1.00000 | 1.00000 | 0.79879 | 3.28793 | 118.42 |
| 0.83097 | 0.65010 | 0.69135 | 0.67017 | 0.57865 | 0.56842 | 0.62474 | 0.49665 | 0.53021 | | | | | | | 0.79794 | 5.82766 | 117.83 |
| 0.77498 | 0.58902 | 0.58620 | 0.67338 | 0.57029 | 0.55358 | 0.60708 | 0.42675 | 0.47066 | | | | | | | 0.77357 | 4.34381 | 124.80 |
| 0.81332 | 0.68115 | 0.66271 | 0.82592 | 0.64543 | 0.64376 | 0.67930 | 0.48896 | 0.48105 | 0.48252 | 0.76156 | 0.82239 | 0.94895 | | | 0.77030 | 3.17633 | 114.98 |
| 0.76640 | 0.71251 | 0.67635 | 0.65075 | 0.63036 | 0.62994 | 0.66703 | 0.46457 | 0.45533 | 0.53433 | 0.86991 | 0.82642 | 0.87356 | 0.88461 | 0.94793 | 0.76205 | 3.06879 | 127.37 |
| 0.80732 | 0.65876 | 0.63158 | 0.58631 | 0.59867 | 0.63826 | 0.63094 | 0.44025 | 0.43444 | 0.53588 | 0.77859 | 0.80893 | 0.99114 | | | 0.76810 | 3.53166 | 124.62 |
| 0.91159 | 0.56337 | 0.60650 | 0.58630 | 0.55319 | 0.56974 | 1.00000 | | | | | | | | | 0.82232 | 3.28806 | 110.57 |
| 0.83454 | 0.63876 | 0.71175 | 0.75794 | 0.66506 | 0.68552 | 1.00000 | | | | | | | | | 0.84106 | 3.71514 | 97.43 |
| 0.72799 | 0.56350 | 0.55431 | 0.57887 | 0.55953 | 0.56033 | 0.65859 | 0.44077 | 0.47394 | | | | | | | 0.75035 | 3.14174 | 122.08 |
| 0.74572 | 0.70438 | 0.71700 | 0.68713 | 0.70222 | 0.68812 | 0.86055 | | | | | | | | | 0.86847 | 5.42063 | 104.27 |
| 0.73922 | 0.64800 | 0.70194 | 0.68323 | 0.63704 | 0.60066 | 0.66254 | 0.47918 | 0.53157 | 0.52521 | 0.88743 | 0.98099 | | | | 0.80825 | 4.26096 | 110.11 |
| 0.68220 | 0.64849 | 0.62983 | 0.62207 | 0.59413 | 0.75609 | 0.66000 | 0.49565 | | | | | | | | 0.81947 | 6.50827 | 113.19 |
| 0.73606 | 0.73101 | 0.72193 | 0.70195 | 0.68664 | 0.76940 | 0.91066 | 0.85722 | 1.00000 | 0.97210 | | | | | | 0.88101 | 3.12856 | 95.89 |
| 0.64562 | 0.60188 | 0.61084 | 0.68062 | 0.60510 | 0.59456 | 0.62829 | 0.46624 | | | | | | | | 0.81071 | 4.11663 | 113.38 |
| 0.99469 | 0.73046 | 0.74191 | 0.69670 | 0.68609 | 0.70657 | 0.68416 | 0.58397 | 0.55757 | | | | | | | 0.84415 | 3.56825 | 110.54 |
| 0.72067 | 0.69522 | 0.67487 | 0.66695 | 0.61147 | 0.65424 | 0.62649 | 0.47345 | 0.46875 | 0.46215 | 0.74794 | 0.79290 | | | | 0.80018 | 3.04286 | 116.18 |
| 0.86090 | 0.84948 | 0.82696 | 0.77250 | 0.70318 | 0.67870 | 0.68020 | 0.55096 | 0.52668 | 0.55118 | 0.80421 | | | | | 0.83891 | 4.46790 | 107.01 |
| 0.65815 | 0.62224 | 0.66141 | 0.64917 | 0.62605 | 0.64436 | 0.64360 | 0.47159 | 0.47212 | 0.50250 | 0.77890 | 0.82091 | 0.86324 | | | 0.77520 | 3.71064 | 113.30 |
| 1.00000 | 0.55747 | 0.56590 | 0.60572 | 0.53709 | 0.49158 | 0.53111 | 0.36061 | 0.34411 | 0.48613 | 0.78364 | 0.86172 | 0.96572 | 0.99755 | 1.00000 | 0.74523 | 3.86357 | 123.45 |

Valores medidos de ETC en las 23 parcelas de control (Fechas Landsat).

| Días | 0 | 16 | 32 | 48 | 64 | 80 | 96 | 112 | 128 | 144 | 160 | 176 | 192 | 208 | 224 | 240 |
|-------------------|---|---------|----------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|---------|---------|
| Días entre imagen | | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 |
| 12026 | | | | | 0.11681 | 0.14987 | 0.21747 | 0.03606 | 0.14048 | 0.15086 | 0.32047 | 0.35625 | 0.27756 | 0.38324 | 0.48594 | 0.54334 |
| 1587 | | | | | | | | | | -0.08399 | -0.03813 | -0.02987 | 0.05630 | 0.22296 | 0.40899 | 0.37810 |
| 23698 | | | | | | | 0.13796 | -0.06171 | 0.06588 | 0.07674 | 0.22891 | 0.24050 | 0.20064 | 0.32104 | 0.46412 | 0.47949 |
| 12391 | | | | | 0.13351 | 0.14510 | 0.20816 | 0.01228 | 0.11428 | 0.09108 | 0.27078 | 0.33665 | 0.27840 | 0.35927 | 0.45293 | 0.51739 |
| 11728 | | | | | | | | | | | | -0.02643 | -0.03694 | 0.08288 | 0.28004 | 0.44076 |
| 13499 | | | | | 0.14751 | 0.11858 | 0.16087 | -0.02836 | 0.08502 | 0.09628 | 0.24553 | 0.31016 | 0.23060 | 0.40185 | 0.51046 | 0.51227 |
| 13688 | | | | | | 0.21947 | 0.13596 | -0.05782 | 0.09507 | 0.13224 | 0.27077 | 0.29745 | 0.21645 | 0.36265 | 0.51257 | 0.50752 |
| 4356 | | | | | | | | | | | 0.28811 | -0.10299 | -0.10458 | 0.03247 | 0.24469 | 0.38225 |
| 12111 | | | | | | | | | | | | | -0.01705 | 0.06912 | 0.28900 | 0.39131 |
| 3435 | | | | | | | | -0.07759 | -0.04112 | 0.00943 | 0.14750 | 0.18526 | 0.17853 | 0.33121 | 0.46509 | 0.50964 |
| 9515 | | | | | 0.12045 | 0.14614 | 0.25539 | 0.02384 | 0.24030 | 0.19707 | 0.39723 | 0.32642 | 0.27929 | 0.40989 | 0.51354 | 0.52060 |
| 24575 | | | | | | 0.15262 | 0.18180 | -0.04388 | 0.06332 | 0.08976 | 0.22917 | 0.26413 | 0.20053 | 0.15366 | 0.22087 | 0.30127 |
| 20067 | | | | | | | 0.13309 | -0.08265 | 0.02427 | 0.02850 | 0.21123 | 0.26578 | 0.24849 | 0.36700 | 0.48664 | 0.53939 |
| 23037 | | | | | 0.16544 | 0.14657 | 0.19294 | 0.02569 | 0.18254 | 0.08350 | 0.17819 | 0.20685 | 0.15698 | 0.27223 | 0.41274 | 0.40314 |
| 15336 | | | | | 0.17969 | 0.17232 | 0.19320 | -0.03734 | 0.05808 | 0.07312 | 0.12985 | 0.06252 | -0.02137 | 0.27332 | 0.35706 | 0.35889 |
| 20309 | | 0.11545 | -0.00249 | 0.17982 | 0.14411 | 0.16178 | 0.33116 | 0.10735 | 0.19820 | 0.22535 | 0.37730 | 0.12470 | 0.13154 | 0.29490 | 0.45650 | 0.46525 |
| 21218 | | 0.07746 | 0.00880 | 0.19420 | 0.16876 | 0.16303 | 0.23883 | -0.01947 | 0.09739 | 0.08617 | 0.08110 | 0.07974 | 0.06382 | 0.17024 | 0.37038 | 0.39332 |
| 4283 | | | | 0.15347 | 0.11312 | 0.12995 | 0.23300 | 0.08489 | 0.26469 | -0.01112 | 0.20999 | 0.09133 | 0.11263 | 0.22416 | 0.40726 | 0.52128 |
| 13424 | | | | | 0.16510 | 0.14807 | 0.23436 | -0.06217 | 0.01245 | 0.07624 | 0.22675 | 0.10283 | 0.17259 | 0.43551 | 0.53102 | 0.37881 |
| 3741 | | | | | 0.24038 | 0.21623 | 0.21763 | -0.01242 | 0.09257 | 0.04921 | 0.15116 | 0.05275 | 0.07114 | 0.17124 | 0.33831 | 0.35580 |
| 21470 | | | | | | | | 0.00212 | 0.10778 | 0.10834 | 0.12802 | 0.09358 | -0.04647 | 0.03653 | 0.13758 | 0.21426 |
| 23071 | | | | | | | | 0.01808 | 0.02686 | -0.00602 | 0.09790 | 0.20094 | 0.09834 | 0.18501 | 0.29747 | 0.36653 |
| 22371 | | | | | | | | | | | | -0.07413 | -0.05724 | 0.08858 | 0.25287 | 0.42271 |

Valores medidos de ETc en las 23 parcelas de control (Fechas Landsat) (continuación).

| 256 | 272 | 288 | 304 | 336 | 352 | 400 | 416 | 432 | 464 | 480 | 496 | 512 | 544 | 560 | Promedio |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|
| 16 | 16 | 16 | 16 | 32 | 16 | 48 | 16 | 16 | 32 | 16 | 16 | 16 | 32 | 16 | |
| 0.49367 | 0.60085 | 0.61549 | 0.52198 | 0.54169 | 0.56296 | 0.49662 | | | | | | | | | 0.36903 |
| 0.32072 | 0.59562 | 0.53038 | 0.50369 | 0.58859 | 0.63072 | 0.54828 | 0.63619 | 0.67362 | 0.54371 | 0.35951 | | | | | 0.38030 |
| 0.30099 | 0.58868 | 0.61910 | 0.52641 | 0.57543 | 0.57208 | 0.49372 | | | | | | | | | 0.34294 |
| 0.43841 | 0.59534 | 0.61128 | 0.52423 | 0.57614 | 0.57522 | 0.46141 | 0.52907 | | | | | | | | 0.36155 |
| 0.19467 | 0.54406 | 0.59138 | 0.44119 | 0.55190 | 0.59306 | 0.50007 | 0.57510 | 0.61517 | 0.52716 | 0.38561 | 0.32602 | 0.29068 | 0.28004 | 0.20805 | 0.36822 |
| 0.38118 | 0.56081 | 0.55886 | 0.46369 | 0.58200 | 0.58972 | 0.50835 | 0.57587 | 0.57996 | | | | | | | 0.36149 |
| 0.42331 | 0.60101 | 0.61862 | 0.38406 | 0.59965 | 0.61094 | 0.53444 | 0.63378 | 0.59869 | | | | | | | 0.38484 |
| 0.35697 | 0.56191 | 0.58541 | 0.27330 | 0.57237 | 0.59689 | 0.48365 | 0.58908 | 0.63986 | 0.56425 | 0.47140 | 0.41343 | 0.29084 | | | 0.37575 |
| 0.39473 | 0.54947 | 0.59030 | 0.56999 | 0.58249 | 0.59762 | 0.53842 | 0.61290 | 0.68517 | 0.35635 | 0.37609 | 0.42798 | 0.36556 | 0.35193 | 0.27407 | 0.42134 |
| 0.35930 | 0.59093 | 0.62502 | 0.52186 | 0.59087 | 0.57721 | 0.52825 | 0.62962 | 0.65486 | 0.33269 | 0.47470 | 0.44140 | 0.30238 | | | 0.37896 |
| 0.24604 | 0.62591 | 0.61124 | 0.54784 | 0.61669 | 0.58366 | -0.02731 | | | | | | | | | 0.34917 |
| 0.38909 | 0.35257 | 0.53121 | 0.44741 | 0.53133 | 0.54267 | 0.02282 | | | | | | | | | 0.25724 |
| 0.35229 | 0.62114 | 0.64531 | 0.55541 | 0.59711 | 0.60515 | 0.49266 | 0.61017 | 0.60527 | | | | | | | 0.38454 |
| 0.38978 | 0.49096 | 0.50646 | 0.26345 | 0.48301 | 0.50242 | 0.35896 | | | | | | | | | 0.28536 |
| 0.36875 | 0.56659 | 0.53851 | 0.49628 | 0.56975 | 0.55474 | 0.48797 | 0.59180 | 0.60078 | 0.50792 | 0.37656 | 0.27505 | | | | 0.32225 |
| 0.48720 | 0.56646 | 0.59323 | 0.51528 | 0.56666 | 0.40740 | 0.50242 | 0.55195 | | | | | | | | 0.32615 |
| 0.44883 | 0.50125 | 0.53087 | 0.48860 | 0.52597 | 0.45539 | 0.26193 | 0.33414 | 0.12725 | 0.13534 | | | | | | 0.23933 |
| 0.51958 | 0.61058 | 0.60954 | 0.48319 | 0.56465 | 0.56426 | 0.51440 | 0.54124 | | | | | | | | 0.33058 |
| 0.23895 | 0.51069 | 0.53355 | 0.45676 | 0.52734 | 0.50850 | 0.47493 | 0.48462 | 0.55889 | | | | | | | 0.31980 |
| 0.36909 | 0.51321 | 0.54472 | 0.49701 | 0.56222 | 0.55550 | 0.52372 | 0.58147 | 0.64750 | 0.54616 | 0.47687 | 0.40946 | | | | 0.34046 |
| 0.12957 | 0.42303 | 0.45375 | 0.47108 | 0.53711 | 0.58997 | 0.50239 | 0.56996 | 0.62213 | 0.52347 | 0.43452 | | | | | 0.30194 |
| 0.41691 | 0.56540 | 0.54750 | 0.46419 | 0.46788 | 0.50283 | 0.45767 | 0.56029 | 0.60409 | 0.55243 | 0.43442 | 0.39377 | 0.35939 | | | 0.34599 |
| 0.17452 | 0.61576 | 0.61428 | 0.46077 | 0.58599 | 0.64432 | 0.56769 | 0.67412 | 0.73216 | 0.60486 | 0.45403 | 0.41432 | 0.32574 | 0.25972 | 0.18148 | 0.39713 |

Valores medidos de ETc en las 23 parcelas de control (Fechas Landsat) (continuación).

| ETr en periodo (mm) | | 63.1 | 52.4 | 44.4 | 47.3 | 47.2 | 63.8 | 69.1 | 78.7 | 87.7 | 96.3 | 90.1 | 83.4 | 69.5 | 72.7 | 62.6 |
|-------------------------------------|--|---|--------|--------|---------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Días | | 16 | 32 | 48 | 64 | 80 | 96 | 112 | 128 | 144 | 160 | 176 | 192 | 208 | 224 | 240 |
| Ejemplo de cálculo en Excel: | | =SI(0.21747>0.2,63.8*(1.15*0.21747+0.17),0) | | | | | | | | | | | | | | |
| 12026 | | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 26.8015 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 51.8616 | 52.2298 | 40.7988 | 42.4455 | 52.9858 | 49.7567 |
| 1587 | | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 29.6348 | 46.5527 | 37.8617 |
| 23698 | | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 41.7220 | 40.2363 | 33.4213 | 37.4739 | 51.1621 | 45.1601 |
| 12391 | | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 26.1184 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 46.3590 | 50.1994 | 40.8790 | 40.5296 | 50.2264 | 47.8886 |
| 11728 | | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 35.7718 | 42.3726 |
| 13499 | | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 43.5624 | 47.4541 | 36.2950 | 43.9327 | 55.0363 | 47.5201 |
| 13688 | | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 19.9367 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 46.3571 | 46.1369 | 34.9380 | 40.8000 | 55.2124 | 47.1786 |
| 4356 | | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 48.2773 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 32.8165 | 38.1605 |
| 12111 | | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 36.5206 | 38.8122 |
| 3435 | | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 38.2868 | 51.2426 | 47.3311 |
| 9515 | | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 29.5838 | 0.0000 | 35.1270 | 0.0000 | 60.3617 | 49.1391 | 40.9644 | 44.5753 | 55.2932 | 48.1201 |
| 24575 | | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 41.7501 | 42.6843 | 33.4108 | 0.0000 | 30.8251 | 32.3305 |
| 20067 | | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 39.7639 | 42.8560 | 38.0108 | 41.1476 | 53.0444 | 49.4726 |
| 23037 | | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 36.7502 | 0.0000 | 33.5732 | 46.8659 | 39.6638 |
| 15336 | | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 33.6603 | 42.2106 | 36.4783 |
| 20309 | | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 35.1432 | 0.0000 | 0.0000 | 37.6369 | 58.1552 | 0.0000 | 0.0000 | 35.3849 | 50.5248 | 44.1355 |
| 21218 | | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 28.3690 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 43.3250 | 38.9570 |
| 4283 | | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 27.9413 | 0.0000 | 37.3349 | 0.0000 | 39.6266 | 0.0000 | 0.0000 | 29.7306 | 46.4081 | 48.1688 |
| 13424 | | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 28.0408 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 41.4825 | 0.0000 | 0.0000 | 46.6233 | 56.7548 | 37.9125 |
| 3741 | | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 21.1165 | 19.7608 | 26.8138 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 40.6437 | 36.2561 |
| 21470 | | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 26.0668 |
| 23071 | | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 36.1372 | 0.0000 | 0.0000 | 37.2289 | 37.0285 |
| 22371 | | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 33.5004 | 41.0728 |

Valores medidos de ETc en las 23 parcelas de control (Fechas Landsat) (continuación).

| 64.8 | 74.5 | 83.7 | 85.2 | 144.3 | 72.6 | 164.4 | 45.9 | 40.4 | 104.3 | 60.3 | 72.3 | 84.2 | 177.0 | 82.9 | Suma |
|---------|---------|---------|---------|----------|---------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|---------|-----------|
| 256 | 272 | 288 | 304 | 336 | 352 | 400 | 416 | 432 | 464 | 480 | 496 | 512 | 544 | 560 | |
| 47.8043 | 64.1424 | 73.4730 | 65.6276 | 114.4214 | 59.3433 | 121.8392 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 863.5308 |
| 34.9157 | 63.6947 | 65.2805 | 63.8356 | 122.2039 | 65.0008 | 131.6051 | 41.3845 | 38.1646 | 82.9458 | 35.1812 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 858.2616 |
| 33.4459 | 63.1003 | 73.8205 | 66.0613 | 120.0211 | 60.1050 | 121.2905 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 787.0202 |
| 43.6862 | 63.6708 | 73.0678 | 65.8480 | 120.1377 | 60.3670 | 115.1829 | 35.7297 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 879.8905 |
| 0.0000 | 59.2774 | 71.1518 | 57.7115 | 116.1152 | 61.8569 | 122.4905 | 38.1599 | 35.4488 | 80.9606 | 36.9913 | 39.3982 | 42.4602 | 87.0911 | 33.9275 | 961.1854 |
| 39.4213 | 60.7121 | 68.0216 | 59.9167 | 121.1117 | 61.5776 | 124.0574 | 38.2005 | 33.8128 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 880.6324 |
| 42.5609 | 64.1564 | 73.7740 | 52.1143 | 124.0399 | 63.3491 | 128.9894 | 41.2569 | 34.6832 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 915.4838 |
| 37.6174 | 60.8069 | 70.5772 | 41.2623 | 119.5131 | 62.1761 | 119.3859 | 38.8978 | 36.5958 | 85.4096 | 42.9400 | 46.6660 | 42.4764 | 0.0000 | 0.0000 | 923.5787 |
| 40.4310 | 59.7408 | 71.0485 | 70.3315 | 121.1925 | 62.2369 | 129.7421 | 40.1550 | 38.7008 | 60.4732 | 36.3309 | 47.8751 | 49.7113 | 101.7256 | 40.2214 | 1045.2492 |
| 37.7913 | 63.2928 | 74.3906 | 65.6156 | 122.5836 | 60.5331 | 127.8180 | 41.0373 | 37.2928 | 57.6353 | 43.1690 | 48.9910 | 43.5930 | 0.0000 | 0.0000 | 960.6037 |
| 29.3512 | 66.2901 | 73.0642 | 68.1609 | 126.8673 | 61.0717 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 787.9700 |
| 40.0108 | 42.8718 | 65.3603 | 58.3216 | 112.7026 | 57.6496 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 557.9175 |
| 37.2689 | 65.8813 | 76.3433 | 68.9034 | 123.6179 | 62.8662 | 121.0909 | 40.0106 | 34.9888 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 895.2667 |
| 40.0627 | 54.7277 | 62.9787 | 40.2967 | 104.6834 | 54.2886 | 95.8120 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 609.7029 |
| 38.4953 | 61.2074 | 66.0630 | 63.1093 | 119.0785 | 58.6573 | 120.2032 | 39.0411 | 34.7801 | 78.6533 | 36.3636 | 35.1601 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 863.1616 |
| 47.3218 | 61.1962 | 71.3305 | 64.9710 | 118.5649 | 46.3558 | 122.9353 | 36.9375 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 830.5936 |
| 44.4629 | 55.6097 | 65.3280 | 62.3569 | 111.8133 | 50.3628 | 77.4691 | 25.4405 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 603.4940 |
| 49.7350 | 64.9760 | 72.8999 | 61.8268 | 118.2323 | 59.4518 | 125.2008 | 36.3725 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 817.9054 |
| 28.8226 | 56.4184 | 65.5860 | 59.2376 | 112.0396 | 54.7969 | 117.7377 | 33.3839 | 32.8338 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 771.6705 |
| 38.5203 | 56.6339 | 66.6610 | 63.1812 | 117.8289 | 58.7207 | 126.9625 | 38.4961 | 36.9509 | 83.2397 | 43.3198 | 46.3357 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 921.4417 |
| 0.0000 | 48.9078 | 57.9044 | 60.6406 | 113.6624 | 61.5982 | 122.9304 | 37.8883 | 35.7723 | 80.5185 | 40.3829 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 686.2725 |
| 42.0838 | 61.1054 | 66.9281 | 59.9657 | 102.1738 | 54.3234 | 114.4741 | 37.3779 | 34.9340 | 83.9917 | 40.3759 | 45.0312 | 49.1134 | 0.0000 | 0.0000 | 902.2732 |
| 0.0000 | 65.4201 | 73.3569 | 59.6300 | 121.7734 | 66.1359 | 135.2747 | 43.3866 | 40.8840 | 90.2809 | 41.7356 | 46.7396 | 45.8555 | 82.9566 | 0.0000 | 988.0032 |