

Aptitud agroecológica para el cultivo de la caña de azúcar en el sur de Tamaulipas, México

Anabel Jiménez Córdova*

Virginia Vargas Tristán*

Wilver Enrique Salinas Castillo*

Manuel de Jesús Aguirre Bortoni*

Dionisio Rodríguez Cabrera*

Recibido: 4 de julio de 2003

Aceptado en versión final: 11 de mayo de 2004

Resumen. El objetivo principal de la investigación fue estimar desde el punto de vista agroecológico las zonas aptas potenciales para el cultivo de caña de azúcar en el sur del estado de Tamaulipas, México. La delimitación de estas zonas se generó mediante la implementación de un sistema de información geográfica (SIG), el cual facilitó la manipulación y sobreposición de capas de información temática, correspondiente a información de clima, suelos y necesidades biofísicas del cultivo. Como primer resultado, y con base en la estimación del índice de satisfacción de las necesidades hídricas y de los grados día de desarrollo, se determinó la zonificación agroclimática. Para generar estos índices se analizó información a nivel diario de 30 estaciones climatológicas (período 1960-1999). Para realizar la zonificación agroecológica se clasificó información de Unidades, Fases, Texturas y Pendientes de suelo, en función de la aptitud del cultivo a estas variables y mediante la sobreposición y álgebra de éstas con la zonificación agroclimática, se delimitaron las zonas aptas potenciales para el cultivo. Se encontró que del total de la superficie evaluada (1 454 794.0 ha), el 30.6% (446 021.0 ha) se clasificó como Muy Apta (MA), el 9.9% (145 104.9.0 ha) como Apta (A), cuyas restricciones fueron por Unidades de suelos, el 0.03% (559.5 ha) se clasificó como marginalmente Apta (mA), con restricciones por la Pendiente de los suelos en estudio y el 59.5% (863 108.9 ha) restante, correspondió a la clase No Apta para el cultivo.

Palabras clave: Caña de azúcar, zonificación agroclimática, zonificación agroecológica, sistema de información geográfica, álgebra de mapas.

Agroecological suitability for the sugarcane crop in southern Tamaulipas, Mexico

Abstract. The main objective of the present research was to estimate the potential zones for the sugarcane crop in the southern region of the State of Tamaulipas, Mexico, from an agroecological point of view. The delimitation of these zones

* Unidad Académica Multidisciplinaria Agronomía y Ciencias, Universidad Autónoma de Tamaulipas, Centro Universitario Victoria, 87149, Cd. Victoria, Tamaulipas. Anabel_j@hotmail.com

were generated by the implementation of a Geographical Information System (GIS) that facilitate the manipulation and overlay of thematic information layers, correspondent to information about weather, soils, and biophysical needs of the crop. As a first result, the agroclimatical zoning was determined, based on the estimation of the satisfaction index of the hydric needs and the growing degrees days. In order to get these indexes, daily information of 30 weather stations (period 1960-1999) was analyzed. To obtain the agroecological zoning, information on Units, Phases, Textures and soil Slopes was classified, in function of the crop aptitude to these variables and using the overlay and their algebra with the agroclimatical zoning, in this way potential zones for the crop were fixed. From the total of the evaluated surface (1 454 794.1 ha), 30.6% (446 021.0 ha) was classified as Very Apt (VA), 9.9% (145 104.9 ha) as Apt (A), whose restrictions were soil units, 0.03% (559.5 ha) was classified as marginally Apt (mA), with restrictions on the soils slopes; the rest, 59.5% (863 108.9 ha) correspond to No Apt (NA) for the studied crop.

Key words: Sugarcane, agroclimatical zoning, agroecological zoning, geographical information system, map algebra.

INTRODUCCIÓN

La caña de azúcar es un cultivo de gran importancia tanto a nivel mundial y nacional, como regional, debido a la gran captación económica que reviste. 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), respectivamente (INEGI, 2003:602).

La zona cañera de México está constituida por 15 estados, 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 245 474.0, 68 744.0 y 58 029 ha, respectivamente (COAAZUCAR, 2002).

A nivel nacional, Tamaulipas ocupa el quinto lugar en superficie cultivable con caña de azúcar, con una extensión aproximada de 45 000.0 ha, tanto en condiciones de riego como de temporal con un rendimiento anual

de 59.8 tn ha⁻¹, mismo que se encuentra en un 15.4% por debajo de la media nacional. Este rendimiento difiere notablemente debido a los distintos tipos de suelos y climas, presentes en la zona cañera del estado (sur de Tamaulipas), debido a lo cual es necesario caracterizar ambientes con condiciones similares (zonas agroecológicas), que expresen el potencial productivo de la zona para el cultivo.

Los estudios de zonificación agroecológica de cultivos (ZAE), desempeñan un papel muy importante en la delimitación de áreas, en las cuales es posible definir qué cultivos tienen mayor potencial de producción. Las investigaciones más avanzadas al respecto han incorporado bases de datos enlazadas a sistemas de información geográfica (SIG), relacionadas a modelos estadísticos, que contienen múltiples aplicaciones potenciales en el manejo de los recursos naturales y planificación del uso de la tierra (FAO, 1997).

En esta investigación se recurrió al uso de los SIG con la finalidad de identificar limitaciones ambientales para el cultivo de la caña de azúcar y estimar las zonas más idóneas para su establecimiento en la región sur del estado de Tamaulipas. Para lograr este objetivo se delimitaron zonas prioritarias en función de variables climáticas, edáficas y de las

necesidades biofísicas del cultivo.

Zonificación agroecológica de cultivos

La zonificación agroecológica (ZAE) se refiere a la división de la superficie de la tierra en Unidades más pequeñas, que tienen características similares relacionadas con su aptitud, con la producción potencial y con el impacto ambiental (FAO 1997).

Una de las instituciones que ha tenido gran interés por generar estudios enfocados a la zonificación de cultivos es el Colegio de Postgraduados (Montecillo, Estado de México). El Centro de Edafología de esta institución inició, en 1980, investigaciones enfocadas a la adaptación de la metodología de zonas agroecológicas a las condiciones ambientales de México (Tijerina y Ortiz, 1990: 113). Estas investigaciones sentaron las bases para aplicar la metodología en estudios agroclimáticos (Díaz *et al.*, 2000) y agroecológicos (Ruiz, 1998:267-275 y Villa *et al.*, 2001), en diversos estados y regiones del país.

Al respecto, se puede citar a Parra (1989: 108) quien realizó una zonificación agroecológica para la producción de caña de azúcar en los estados de Veracruz, Tabasco, Jalisco, Colima y Nayarit. El primer objetivo fue hacer una comparación de la influencia que representa el clima y el suelo en las zonificaciones agroclimática y agroecológica y, en segundo lugar, si los resultados obtenidos eran más eficientes a nivel zona, región o estado. Para el primer objetivo se obtuvo que la contribución del suelo no presentó mayor poder predictivo sobre el rendimiento del cultivo, como lo tuvieron los factores climáticos. Para el segundo objetivo se determinó que es mejor trabajar las zonificaciones agroclimática y agroecológica a nivel estado,

debido a que se incrementaron los coeficientes de determinación ($R^2 = 0.72$ y 0.79) comparados con los resultados a nivel regional ($R^2 = 0.46$ y 0.56) y a nivel zona ($R^2 = 0.63$ y 0.57).

Dentro de los estudios de índole climático relacionados con la caña de azúcar se pueden citar los siguientes:

Namuche (1983:124) generó modelos empíricos para predecir rendimientos relativos de la caña de azúcar para los estados de Veracruz y Morelos, a través de variables agroclimáticas tales como: Déficit evapotranspirativo, Grados Día de Desarrollo (GDD) y de manejo del cultivo. El estudio se llevó a cabo en los ingenios azucareros bajo condiciones de riego, de temporal y de la combinación temporal-riego. Se obtuvo que el déficit evapotranspirativo medio fue inversamente proporcional al fertilizante aplicado y a los GDD. En el caso de los ingenios de temporal, se encontró que el fertilizante aplicado fue aprovechado por la planta a déficit evapotranspirativos más altos que en los ingenios de riego. Finalmente, se llegó a la conclusión de que los modelos encontrados para los ingenios de riego, temporal-riego y temporal, fueron bastante aceptables para la predicción de rendimientos relativos de caña de azúcar, pudiendo ser utilizados por otras zonas cañeras del país.

Figuroa (1991:47) analizó las variables de temperatura, precipitación y rendimientos anuales de la caña de azúcar bajo condiciones de campo y en fábrica, para la región de la Huasteca Potosina. En este estudio se obtuvo que la precipitación y la amplitud térmica acumulada en ocho semanas antes de la cosecha, explicaron en un tercio al comportamiento del rendimiento de fábrica. Respecto al rendimiento de campo, se encontró que los

dos meses anteriores a la cosecha, no pudieron ser explicados estadísticamente por los elementos climáticos estudiados.

Martínez y Martínez (1996:487-494) generaron para la zona cañera de Mante-Xicoténcatl, en el estado de Tamaulipas, un método de cómputo para pronosticar la época óptima de zafra, basándose en un índice climático de madurez, donde se relacionó a la precipitación P_i y a la oscilación térmica (A_i) de la siguiente forma: ($L = P_i/A_i$). Mediante este método, se obtuvo el índice climático de madurez para 11 zafras probables, con una duración de entre 16 y 36 semanas. El autor concluyó que las fechas indicadas para las épocas óptimas de zafra fueron las que mejor integraron los elementos climáticos temperatura y precipitación, en los 38 años analizados, sin embargo, las variaciones anuales podían causar algunas diferencias en las épocas de zafra indicadas.

Uso de los sistemas de información geográfica en zonificaciones agroecológicas

Es importante mencionar que aunque la metodología de zonificación agroecológica (ZAE) propuesta por la FAO (1978) no se diseñó para generarla con sistemas de cómputo, ésta se puede implementar mediante el uso de software especializado, debido a que para su determinación es necesario sobreponer diversas capas de información espacial, con la finalidad de definir zonas con cierto nivel de aptitud. Las investigaciones más avanzadas de zonificaciones agroecológicas, están compuestas por bases de datos enlazadas a un sistema de información geográfica y relacionadas con modelos computarizados, que contienen múltiples aplicaciones potenciales en el manejo de los recursos naturales y planificación del uso de la

tierra (FAO, 1997).

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, versátil e integrada productos de información tales como tablas y mapas (FAO, 1997; Fernández y Sumano, 1992 y Nozica *et al.*, 1997:6).

La principal utilidad de un SIG radica en su capacidad para construir modelos o representaciones del mundo real, a partir de una base de datos digital. Los modelos constituyen un instrumento eficaz para analizar y determinar los factores que influyen en las tendencias, así como en la evaluación de las posibles consecuencias en las decisiones de planificación sobre los recursos existentes en un área de interés (Carmona y Monsalve, 2000:24). Además, los SIG's permiten almacenar esa información espacial de forma eficiente, simplificando su actualización y acceso directo al usuario. En definitiva, amplían enormemente las posibilidades de análisis que brindan los mapas convencionales, además de facilitar su almacenamiento y visualización (Chuvieco, 2002:586).

Dentro de los estudios agroclimáticos y agroecológicos se tienen diferentes tipos de análisis como la interpolación espacial y el álgebra y sobreposición de mapas (overlay; Bogaert, 1995 y Eastman, 1992:22). El mé-

todo de interpolación espacial más usado en este tipo de estudios, es el de Kriging (Universal 1), debido a que asocia 'al término de Mejor Predictor Lineal Insesgado (MPLI) y es el más adecuado, en el sentido de que minimiza la varianza del error en la predicción. Además, el método se apoya en la geoestadística para modelar datos espacio-temporales, con la finalidad de estimar la dependencia geográfica que existe entre los valores a interpolar (valor Z; Nozica *et al.*, 1997:6). Este método permite conocer el valor en un punto dado donde no se tiene información, lo cual se logra por la autocorrelación espacial de la variable a interpolar. El análisis de la autocorrelación en este método se basa en el "variograma" como instrumento de representación esquemática de la variabilidad espacial (Bosque, 2000:451).

Dentro del álgebra y sobreposición de mapas se utilizan operaciones matemáticas como la adición, sustracción, multiplicación, funciones de evaluación logarítmica o trigonométrica, elevar un mapa a la potencia de otro, búsqueda de valores extremos o promedios, así como las aplicaciones lógicas booleanas, entre otras.

Desde el punto de vista de la distribución espacial y cartográfica, el objetivo principal de una zonificación de cultivos es la identificación de áreas aptas potenciales, las cuales surgen de la sobreposición espacial de información de variables tales como: suelos, clima y cultivos, clasificadas en intervalos de clases. La sobreposición simultánea genera combinaciones únicas que se manifiestan en una extensión espacial a través de un mapa resultante (Ponce, 1994).

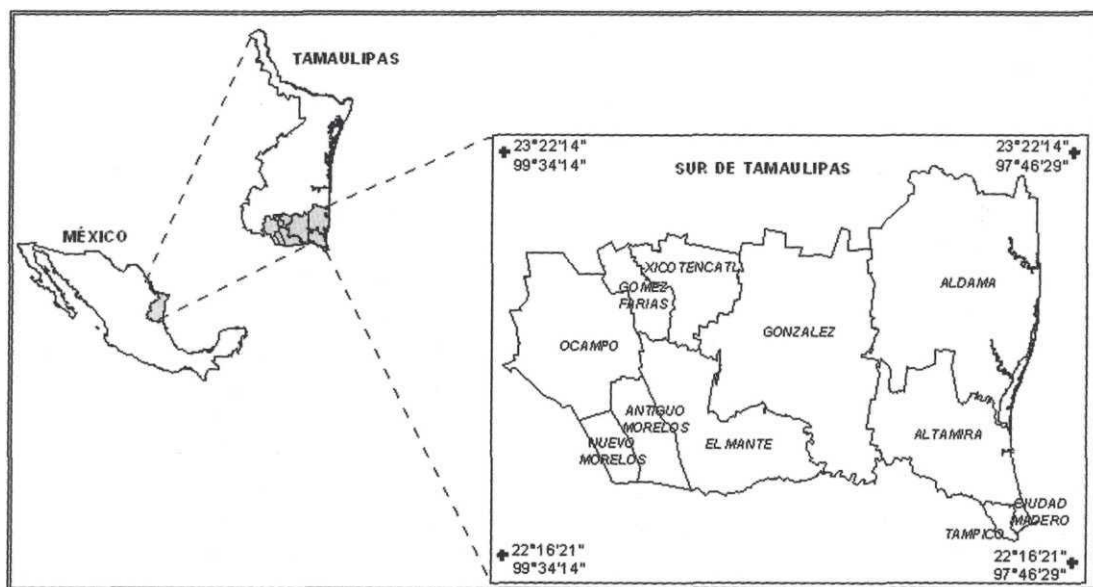


Figura 1. Localización de la zona en estudio.

Aunque el uso de los SIG's para la generación de zonificaciones agroecológicas se ha intensificado en los últimos años, aún son mínimas las investigaciones que se apoyan en este tipo de sistemas. Dentro de éstas, se pueden citar los trabajos realizados por Carbonell *et al.*, (2001:59); Díaz *et al.*, (2000: 7-27); Ruiz (1998:267-275) y Villa *et al.*, (2001:1-7).

MATERIALES Y MÉTODOS

Este trabajo de investigación se realizó en la zona sur del estado de Tamaulipas, constituida por los municipios de Tampico, Ciudad Madero, Altamira, Aldama, González, Xicoténcatl, Mante, Ocampo, Gómez Farias, Antiguo y Nuevo Morelos. Corresponde aproximadamente al 18.6% de la superficie estatal y cubre una extensión de 1 454 794.1 ha. Geográficamente se localiza a los 22° 16'21" y 23°22'14" de latitud Norte y a los 97°46'29" y 99°34'14" de longitud Oeste (Figura 1).

La metodología utilizada para zonificar agroecológicamente al cultivo de la caña de azúcar en el sur de Tamaulipas estuvo en función de la información disponible en la zona de interés, tanto de clima, de suelo y como del cultivo en estudio (FAO 1978 y 1997). La metodología fue diseñada para aplicarla en cuatro etapas:

Etapas I: Base de datos

Para realizar el estudio agroecológico, fue necesario contar con tres tipos de información: climática, edáfica y de los requerimientos bioclimáticos de la caña de azúcar. Para crear la base de datos climática, se recopiló información de series históricas a nivel diario, correspondiente a 30 estaciones climatológicas de la zona de estudio. Estas

series contienen información de las variables: temperaturas mínimas y máximas, precipitación y evaporación (período de 1960 a 1999). La información de suelos estuvo integrada por datos numéricos y cartográfica temática referente a: Unidades, Fases, Texturas y Pendientes (INEGI, 1982). La base de datos del cultivo estuvo integrada por los requerimientos térmicos e hídricos, por la fenología de la caña de azúcar en un ciclo de 12 meses (caña resoca) y también por los requerimientos en cuanto a la aptitud del cultivo a los principales tipos de suelos.

Etapas II. Procesamiento de datos

Para la estimación de datos faltantes de temperatura (máxima y mínima) se utilizaron modelos de regresión lineal, a través de los cuales se obtuvieron ecuaciones estadísticas que indicaron la dependencia entre los datos de esta variable. En la aplicación de este método, fue necesario cumplir con ciertas condicionantes tales como distancia menor de 25 km entre las estaciones climáticas a estimar, así como una altitud de ± 30 msnm, además de que contaran con el mismo tipo de clima. Cuando no fue posible la aplicación de los modelos de regresión lineal debido a la gran escasez de datos climáticos, se utilizó el método *Racional Deductivo*, el cual consiste en obtener un valor promedio con los registros reportados en los 10 años anteriores al dato que se está estimando. Debido a que la precipitación presenta una ocurrencia discontinua en tiempo y espacio, no fue posible la estimación de datos faltantes mediante los métodos mencionados anteriormente. Para su estimación se utilizó al método de la *U.S. National Weather Service*, mismo que se aplicó para la estimación de los datos de la variable evaporación (Campos, 1987:4-16).

Etapa III. Zonificación Agroclimática (ZAC)

Cuando se dispuso de todas las series en cada una de las variables climáticas a nivel diario, sin interrupción, se procedió a la obtención de años tipo por serie climática histórica. Posteriormente se determinó la Zonificación Agroclimática (ZAC), para esto, la metodología tradicional de la FAO incluye la estimación del período de crecimiento (PC), sin embargo, cuando se trabaja con cultivos anuales o semiperenes como la caña de azúcar, el PC no es el mejor indicador para evaluar la aptitud agroclimática, debido

a esto, se tomó la decisión de generar la zonificación agroclimática (ZAC) de acuerdo con la determinación del índice de satisfacción de las necesidades hídricas (ISNH) del cultivo y a los Grados Día de Desarrollo (GDD).

Para calcular el ISNH para la caña de azúcar, se estimaron previamente sus necesidades hídricas (NH, mm) anuales, con base en la incidencia de la precipitación anual (Pp, mm). La ecuación utilizada fue la siguiente:

$$ISNH = \frac{Pp * (100)}{NH} \quad (1)$$

Cuadro 1. Coeficientes de cultivo (Kcr) por etapa fenológica para caña de azúcar

| Etapa fenológica | Kcr |
|--|------|
| Etapa 1 (siembra a 25% de cobertura del dosel) | 0.50 |
| Etapa 2 (25 a 50% de cobertura del dosel) | 0.80 |
| Etapa 3 (50 a 75% de cobertura de dosel) | 0.95 |
| Etapa 4 (75 a 100% de cobertura del dosel) | 1.10 |
| Etapa 5 (cubrimiento total) | 1.15 |
| Etapa 6 (madurez temprana) | 0.95 |
| Etapa 7 (maduración) | 0.70 |

Fuente: FAO, 1978.

Cuadro 2. Clasificación de los niveles de aptitud agroclimática con base en el rendimiento máximo esperado, sin restricciones agroclimáticas

| Clases | Porcentaje | Aptitud | Rendimientos |
|--------|------------|-------------------------|---------------------------------|
| MA | 80-100 | Muy Apta (MA) | Tendrá grandes ganancias |
| A | 40-80 | Apta (A) | Tendrá ganancias |
| MA | 20-40 | Marginalmente Apta (mA) | No tendrá ganancias ni pérdidas |
| NA | <20 | No Apta (NA) | Siempre tendrá pérdidas |

Fuente: FAO, 1997.

Las necesidades hídricas se calcularon con la fórmula:

$$NH = ETp * Kcr \quad (1.1)$$

donde:

ETp = evapotranspiración potencial (mm), calculada con la expresión.

ETp = 0.75 * evaporación.

Kcr = coeficientes del cultivo por etapa fenológica (Cuadro 1).

Para la estimación de los Grados Día de Desarrollo (GDD) se utilizó el método residual:

$$GDD = \sum_{i=1}^n \frac{(Tmáx_i + Tmín_i)}{2} - Tbase \quad (2)$$

donde:

GDD = grados día de desarrollo,

Tmáx = temperatura máxima diaria (°C),

Tmín = temperatura mínima diaria (°C),

Tbase = temperatura base de la caña de azúcar (12°C).

Una vez que se estimaron los índices mencionados en las 30 estaciones climatológicas, se sometieron a un análisis espacial, dentro del cual se generó una interpolación utilizando el método Kriging Universal I, incluido en el programa Arcview GIS para PC (versión 3.2^a; Carbonell *et al.*, 2001:59; Herrera, 1999:78; Cristóbal *et al.*, 1996:329-343; Demey y Pradera, 1996:313-333; Arellano, 1994:360; Silva, 1994:24 y González, 1988). El resultado de la interpolación fue una imagen grid (píxel de 300 m²) que fue rediseñada y reclasificada para representar temáticamente la oscilación en espacio y tiempo para cada uno de los índices agroclimáticos, en el

ciclo anual de la caña de azúcar.

Cada mapa temático se clasificó con relación al potencial de aptitud agroclimática y al rendimiento máximo esperado, en cuatro clases: Muy Apta (MA), Apta (A), marginalmente Apta (mA) y No Apta (NA; Cuadro 2). Mediante la sobreposición y álgebra de mapas se promedió cada polígono en ambos índices aproximándose el resultado a números enteros. De esta manera se tuvo un mapa resultante, el cual se clasificó nuevamente en cuatro clases de aptitud que representó a la Zonificación Agroclimática (ZAC) del cultivo de la caña de azúcar para la zona de estudio (ecuación 3).

$$ZAC = \frac{ISNH + GDD}{\text{Núm. total de mapas}} \quad (3)$$

Etapa IV. Zonificación Agroecológica

En esta etapa se generó la zonificación agroecológica para el cultivo, es decir, la localización de las zonas aptas potenciales a partir de las modificaciones por variables edáficas (Unidades, Fases, Texturas y Pendientes) a la zonificación agroclimática (ZAC) obtenida en la etapa anterior. Para esto, se tomó la calificación del nivel de inversión bajo propuesta por la FAO (1978) para cada una de las variables edáficas antes mencionadas.

Para realizar este tipo de modificación, primero se clasificó cada Unidad y subunidad de suelo de acuerdo con la aptitud para la caña de azúcar, de la siguiente forma: S1, suelo muy apto, donde no existe restricción y permanece la clasificación agroclimática; S2, suelo marginalmente apto, donde existe una restricción moderada y la clasificación agroclimática se degrada una clase; N1, suelo no apto actualmente; y N2, suelo no apto permanentemente (FAO, 1978).

Cuando se encontró un suelo clasificado como S2/N2 o N1/N2, se tomó la decisión de tomar la aptitud indicada en el numerador de dicha clasificación, esto de acuerdo con lo reportado por Tijerina y Ortiz (1990:113). Una vez que se realizó esta clasificación a la ZAC en el SIG, se hizo una sobreposición cartográfica del mapa resultante a las Fases de suelos presentes en la zona de estudio y se procedió a la clasificación por esta variable para obtener la cartografía de la modificación por aptitud del cultivo. Las Fases se clasificaron en tres clases: 0 (sin cambio), -1 (restricción de una clase) y NA (No Apto). Siguiendo la clasificación, la cartografía de la modificación por Fases se reclasificó en función de la Textura de los suelos de la zona de estudio. Las modificaciones por esta variable para caña de azúcar fueron dos: Texturas que degradan una clase a la aptitud (-1) y Texturas que no modifican a ninguna aptitud (0). La Pendiente del terreno es la última variable edáfica que puede modificar la aptitud de la caña de azúcar, en una determinada región. Para realizar esta última modificación, se clasificó la Pendiente de terreno de la zona de estudio con base en tres clases: 0 (permanece sin cambio), -1 (se degrada una clase), N (no es apta) y se calificó al mapa resultante de la modificación por Textura. Este último mapa correspondió a la Zonificación Agroecológica (ZAE) para el cultivo de la caña de azúcar en la zona en estudio.

RESULTADOS

Se analizaron y depuraron series climáticas de 20 a 39 años de información diaria, en las variables; temperaturas mínimas y máximas, precipitación y evaporación, correspondiente a 30 estaciones climatológicas del sur de Tamaulipas. Mediante este análisis, se com-

probó que la información con la que se cuenta en el área en estudio fue confiable y que proporcionó las bases para realizar la Zonificación Agroecológica (ZAC) para caña de azúcar en el sur de Tamaulipas; sin embargo, una red de estaciones climatológicas más densa y eficientemente equipada, proporcionaría información más detallada y específica de la zona de estudio, por lo cual se considera importante la instalación de nuevas estaciones climáticas para disponer de una red representativa.

Necesidades hídricas

De acuerdo con el Cuadro 3, los valores de necesidades hídricas (NH) del cultivo más elevado, se obtuvieron en la etapa fenológica 5 (cubrimiento total del dosel) con requerimientos de 3.9 a 6.5 mm. En la mayoría de las estaciones climatológicas predominaron NH superiores a los 5 mm. Las NH más bajas se encontraron en la etapa fenológica de siembra-brotación (etapa 1), siendo éstos de 0.6 mm, en las estaciones que se localizan en la Sierra Madre Oriental a la altura de los municipios de Gómez Farías y Ocampo. En la última etapa fenológica, correspondiente a maduración, las NH se asemejan a las de la etapa 1, presentándose éstas en los municipios de Xicotécatl y González.

En estudios anteriores, García (1973:224) reportó para las zonas cañeras de México, que las NH oscilan de 5.48 a 6.84 mm día⁻¹, lo que equivale a una necesidad de 2 000 a 2 500 mm año⁻¹. Contrario a esto, en la zona en estudio se tiene una necesidad hídrica de 815.4 a 1 452.1 mm año⁻¹, los cuales son sobrestimados del 41.0 al 59.0%, comparados con lo propuesto por García. Se considera que no es conveniente reportar de 5.48 a 6.84 mm día⁻¹ como necesidades NH, debido

a que en la primera etapa del cultivo se inicia la brotación de las yemas vegetativas y, al final de ésta, la cobertura del dosel es sólo del 25%, por esta razón se consideró importante reportar las mínimas y máximas NH del cultivo por etapa fenológica, debido a que con base en éstas se puede hacer el adecuado suministro de agua y en el tiempo apropiado al cultivo, eficientando así el recurso hídrico y reduciendo los costos al productor en el caso de contar con riego.

En las etapas 4 y 5 del cultivo se estimaron NH semejantes a las reportadas por García (*Ibid.*), éstas oscilaron de 4.1 a 6.5 mm día¹. Es importante mencionar que los datos reportados por este autor se desprenden de utilizar el método de Blaney-Criddle para la estimación de la evapotranspiración potencial, que involucra a la insolación y la temperatura media.

Es de sobra conocido que entre más variables se utilicen en la estimación de otra se considera de mejor precisión, sólo que este método es a nivel mensual y para resultados más específicos es necesario efectuarlo en períodos más cortos. A esto podría deberse la discrepancia en cuanto a los datos de NH reportados por García, con respecto a los encontrados en esta investigación.

Índice de Satisfacción de las Necesidades Hídricas de los Cultivos (ISNH)

El ISNH se clasificó en cuatro categorías: Muy Apta-MA (80-100%), Apta-A (80-40%), Marginalmente Apta-mA (40-20%) y No Apta-NA (<20%). Los resultados mostraron que el 86.7% de la superficie del sur de Tamaulipas (1 265 316.4 ha), resultó MA para el cultivo de la caña de azúcar, ya que anualmente se satisfacen entre un 80 y un 100% las necesidades hídricas de la caña. En

menor proporción se encontró la clase A la cual cubrió una superficie de 189 477.5 ha y abarcó en gran parte al municipio de González y en menor escala a Xicoténcatl y Mante. Agroclimáticamente no se encontraron zonas clasificadas como mA y NA para el cultivo en estudio, debido a que el ISNH cubrió más del 59% de sus NH.

Grados Día de Desarrollo (GDD)

Los resultados encontrados para esta variable mostraron que anualmente hay una acumulación térmica que oscila de 3 920.3 a 5 023.3 GDD para el cultivo de la caña de azúcar. Estos resultados coinciden con lo reportado por Namuche (1983) para este cultivo en el estado de Veracruz, donde se encontró una acumulación de 8 200.9 GDD para un ciclo de 18 meses, es decir, que para un ciclo anual la acumulación fue del orden de los 5 467 GDD. La diferencia con los resultados reportados por Namuche fue de 434 GDD, lo cual no fue muy significativo, tomando en cuenta que la temperatura media que utilizó este autor osciló entre 20.0 y 26.4° C, comparadas con las temperaturas de la zona de estudio que fueron de 23.0 a 24.8° C.

Al clasificar la acumulación de GDD de acuerdo con el rendimiento máximo esperado en las cuatro clases de aptitud (MA, A, mA y NA), se encontró que se tiene una alta disponibilidad de GDD para que el cultivo se desarrolle adecuadamente en la zona en estudio, de esta manera, la disponibilidad más alta, es decir, la clase MA, se encontró en la mayor parte del sur de Tamaulipas, cubriendo una superficie de 1 398 455.8 ha (96.1%). En menor proporción se localizó la clase A, la cual cubrió una extensión de 56 338.3 (3.9%) ha. En esta aptitud se podrían

Cuadro 3. Necesidades hídricas (máximas y mínimas, mm) por etapa fenológica de la caña de azúcar, en el sur de Tamaulipas

| Estación Climatológica | Etapas Fenológicas | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|--------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | | 5 | | 6 | | 7 | |
| | Máx | Mín | Máx | Mín | Máx | Mín | Máx | Mín | Máx | Mín | Máx | Mín | Máx | Mín |
| Tampico | 2.2 | 0.7 | 3.6 | 1.1 | 4.2 | 1.3 | 4.9 | 1.5 | 5.1 | 1.6 | 4.2 | 1.3 | 3.1 | 0.9 |
| Los Tomates | 2.4 | 0.6 | 3.9 | 0.9 | 4.6 | 1.1 | 5.3 | 1.3 | 5.6 | 1.3 | 4.6 | 1.1 | 3.4 | 0.8 |
| Barberena | 2.4 | 0.7 | 3.8 | 1.1 | 4.6 | 1.3 | 5.3 | 1.5 | 5.5 | 1.5 | 4.6 | 1.3 | 3.4 | 0.9 |
| El Barranco | 2.3 | 0.8 | 3.7 | 1.3 | 4.4 | 1.5 | 5.1 | 1.7 | 5.3 | 1.8 | 4.4 | 1.5 | 3.3 | 1.3 |
| Santa Juana | 2.1 | 0.7 | 3.4 | 1.2 | 4.1 | 1.4 | 4.7 | 1.6 | 4.9 | 1.7 | 4.1 | 1.4 | 3.0 | 1.0 |
| Altamira | 2.3 | 0.7 | 3.7 | 1.2 | 4.4 | 1.4 | 5.1 | 1.6 | 5.4 | 1.7 | 4.4 | 1.4 | 3.3 | 1.0 |
| Aldama | 2.3 | 0.7 | 3.7 | 1.2 | 4.4 | 1.4 | 5.1 | 1.6 | 5.4 | 1.7 | 4.4 | 1.4 | 3.3 | 1.0 |
| El Carrizal | 2.4 | 0.7 | 3.8 | 1.1 | 4.5 | 1.3 | 5.2 | 1.5 | 5.4 | 1.6 | 4.5 | 1.6 | 3.3 | 1.0 |
| La Esperanza | 2.4 | 0.8 | 3.8 | 1.3 | 4.5 | 1.5 | 5.3 | 1.7 | 5.5 | 1.8 | 4.5 | 1.5 | 3.4 | 1.1 |
| Tamesí | 2.6 | 0.6 | 4.2 | 1.0 | 5.0 | 1.2 | 5.8 | 1.4 | 6.1 | 1.4 | 5.0 | 1.2 | 3.7 | 0.9 |
| Atotonilco | 2.7 | 0.8 | 4.3 | 1.2 | 5.1 | 1.5 | 5.9 | 1.7 | 6.1 | 1.8 | 5.1 | 1.5 | 3.7 | 1.1 |
| El Lajal | 2.4 | 0.8 | 3.8 | 1.3 | 4.5 | 1.6 | 5.2 | 1.8 | 5.5 | 1.9 | 4.5 | 1.6 | 3.3 | 1.1 |
| González | 2.2 | 0.6 | 3.5 | 1.0 | 4.2 | 1.2 | 4.9 | 1.3 | 5.1 | 1.4 | 4.2 | 1.2 | 3.1 | 0.8 |
| Tancasmeque | 2.8 | 0.8 | 4.5 | 1.2 | 5.3 | 1.5 | 6.2 | 1.7 | 6.5 | 1.8 | 5.3 | 1.5 | 3.9 | 1.1 |
| San Lorenzo | 2.8 | 1.0 | 4.4 | 1.6 | 5.2 | 1.9 | 6.1 | 2.2 | 6.3 | 2.3 | 5.2 | 1.9 | 3.9 | 1.4 |
| Xicoténcatl | 2.6 | 1.0 | 4.2 | 1.6 | 5.0 | 1.9 | 5.7 | 2.2 | 6.0 | 2.2 | 5.0 | 1.9 | 3.7 | 1.4 |
| San Gabriel | 2.8 | 1.1 | 4.4 | 1.7 | 5.3 | 2.0 | 6.1 | 2.4 | 6.4 | 2.1 | 5.3 | 2.0 | 3.9 | 2.5 |
| Las Animas | 2.5 | 0.8 | 4.0 | 1.3 | 4.8 | 1.6 | 5.6 | 1.8 | 5.8 | 1.9 | 4.8 | 1.6 | 3.5 | 1.2 |
| Lázaro Cárdenas | 2.4 | 0.7 | 3.8 | 1.1 | 4.5 | 1.3 | 5.2 | 1.5 | 5.4 | 1.6 | 4.5 | 1.3 | 3.3 | 0.9 |
| El Refugio | 2.4 | 0.7 | 3.9 | 1.1 | 4.6 | 1.3 | 5.4 | 1.5 | 5.6 | 1.6 | 4.6 | 1.3 | 3.4 | 1.0 |
| Bellavista | 2.6 | 0.7 | 4.1 | 1.2 | 4.9 | 1.4 | 5.6 | 1.6 | 5.9 | 1.7 | 4.9 | 1.4 | 3.6 | 1.0 |
| Servilleta | 2.4 | 0.7 | 3.9 | 1.1 | 4.6 | 1.3 | 5.3 | 1.5 | 5.6 | 1.5 | 4.6 | 1.3 | 3.4 | 0.9 |
| San Felipe | 2.7 | 1.1 | 4.3 | 1.7 | 5.1 | 2.0 | 5.9 | 2.4 | 6.2 | 2.5 | 5.1 | 2.0 | 3.7 | 1.5 |
| CEI | 2.5 | 0.6 | 4.0 | 1.0 | 4.8 | 1.1 | 5.5 | 1.3 | 5.8 | 1.4 | 4.8 | 1.1 | 3.5 | 0.8 |
| F. Callejones | 2.0 | 0.7 | 3.3 | 1.0 | 3.9 | 1.2 | 4.5 | 1.4 | 4.7 | 1.5 | 3.9 | 1.2 | 2.8 | 0.9 |
| Chamal Nuevo | 2.5 | 0.6 | 4.0 | 1.0 | 4.8 | 1.1 | 5.5 | 1.3 | 5.8 | 1.4 | 4.8 | 1.1 | 3.5 | 0.8 |
| Río Frío | 2.3 | 0.6 | 3.7 | 0.9 | 4.3 | 1.1 | 5.0 | 1.3 | 5.2 | 1.4 | 4.3 | 1.1 | 3.2 | 0.8 |
| G. Farias | 2.1 | 0.6 | 3.3 | 1.0 | 4.0 | 1.2 | 4.6 | 1.4 | 4.8 | 1.4 | 4.0 | 1.2 | 2.9 | 0.9 |
| Ahualulco | 1.7 | 0.7 | 2.7 | 1.1 | 3.2 | 1.2 | 3.7 | 1.5 | 3.9 | 1.6 | 3.2 | 1.3 | 2.4 | 0.9 |
| El Oyul | 2.5 | 0.6 | 3.9 | 1.0 | 4.7 | 1.2 | 5.4 | 1.4 | 5.6 | 1.4 | 4.7 | 1.2 | 3.4 | 0.9 |
| Promedio | 2.4 | 0.7 | 3.9 | 1.2 | 4.6 | 1.4 | 5.3 | 1.6 | 5.5 | 1.7 | 4.6 | 1.4 | 3.4 | 1.1 |

obtener rendimientos por disponibilidad de esta variable, del orden del 40 al 80% del máximo esperado. Las clases de aptitud mA y NA no fueron encontradas en la zona en estudio, debido a que las acumulaciones de GDD fueron mayores al 40%.

Zonificación agroclimática

Los resultados mostraron que, agroclimáticamente, en el sur de Tamaulipas, se dispone de humedad y temperatura favorables para un buen desarrollo y crecimiento de la caña de azúcar, debido a que sólo se encontraron las clases MA y A, las cuales indican rendimientos satisfactorios (Figura 2).

La clase MA predominó en una superficie

de 1 264 975.9 ha, es decir, que en el 86.9% de la extensión territorial de la zona en estudio, se obtienen rendimientos de un 80.0 a un 100.0% del máximo esperado. Esta clase de aptitud quedó establecida principalmente por valores altos de ISNH y de GDD. En menor superficie se encontró a la clase A, la cual cubrió sólo 189 477.5 ha (13.1%) localizadas en la zona norte del municipio de Gómez Farias, en el oeste de Ocampo y parte central de la zona en estudio, con esta clase de aptitud se tendría del 80 al 40% del rendimiento máximo esperado del cultivo. Las clases de aptitud mA y NA, no se encontraron en la zona en estudio, debido a que éstas fueron resultado de bajos ISNH y GDD,

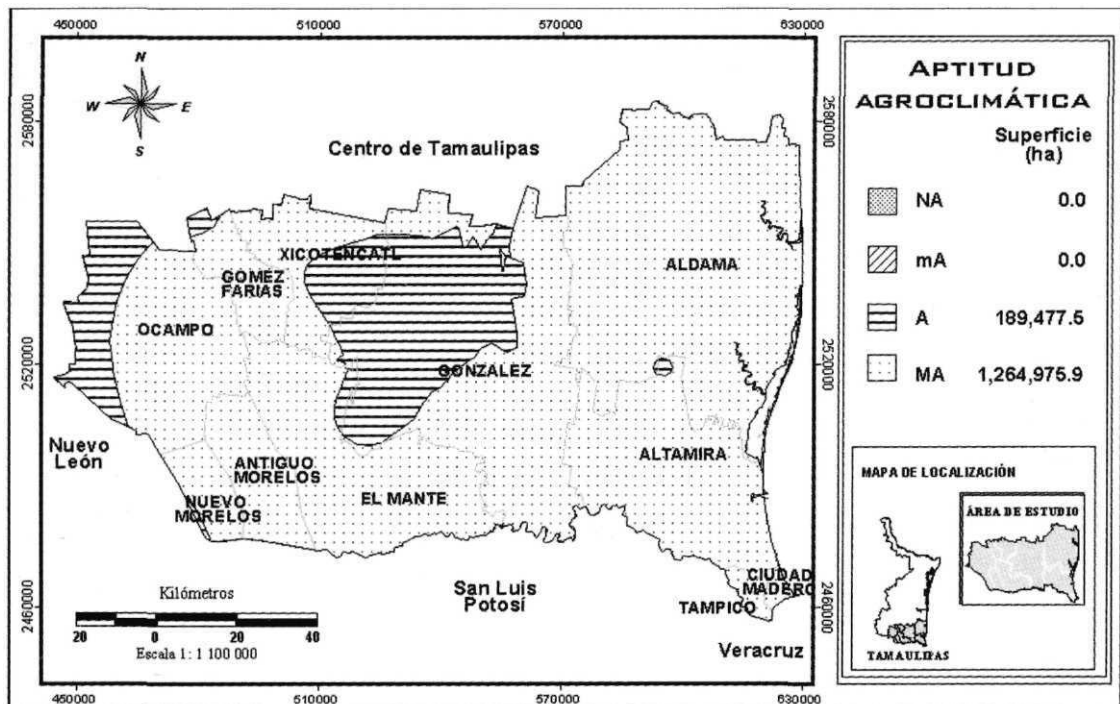


Figura 2. Zonificación agroclimática para el cultivo de la caña de azúcar en el sur de Tamaulipas, México.

y en el área de estudio no se tienen zonas que presenten las dos condiciones.

Zonificación agroecológica

La zonificación agroecológica generada dentro de la presente investigación, muestra las características tanto de clima como de suelo, determinantes en el establecimiento y desarrollo de la caña de azúcar (Figura 3). Las diferentes características clasificadas como mA, A y MA quedaron reducidas sólo al 40.7% de la superficie territorial del sur de Tamaulipas y el 59.3% restante a la superficie NA.

Las condiciones óptimas agroecológicas

para el cultivo quedaron representadas por la característica MA, esto significa que con un adecuado manejo al cultivo y la precipitación que se recibe en la superficie cubierta por esta aptitud, se pueden obtener rendimientos hasta de un 100% (Figura 3). En total, la superficie que correspondió a la clase MA fue de 446 021.0 ha (30.6%), mismas que se distribuyeron hacia el centro y sur del área en estudio donde predominan los suelos de la unidad Vertisol pélico (Vp), aunque éstos presentan problemas de manejo para su utilización en la agricultura son suelos muy fértiles, con Textura de media a fina, con alto contenido de materia orgánica, buena permeabilidad y aereación, pedregosidad esca-

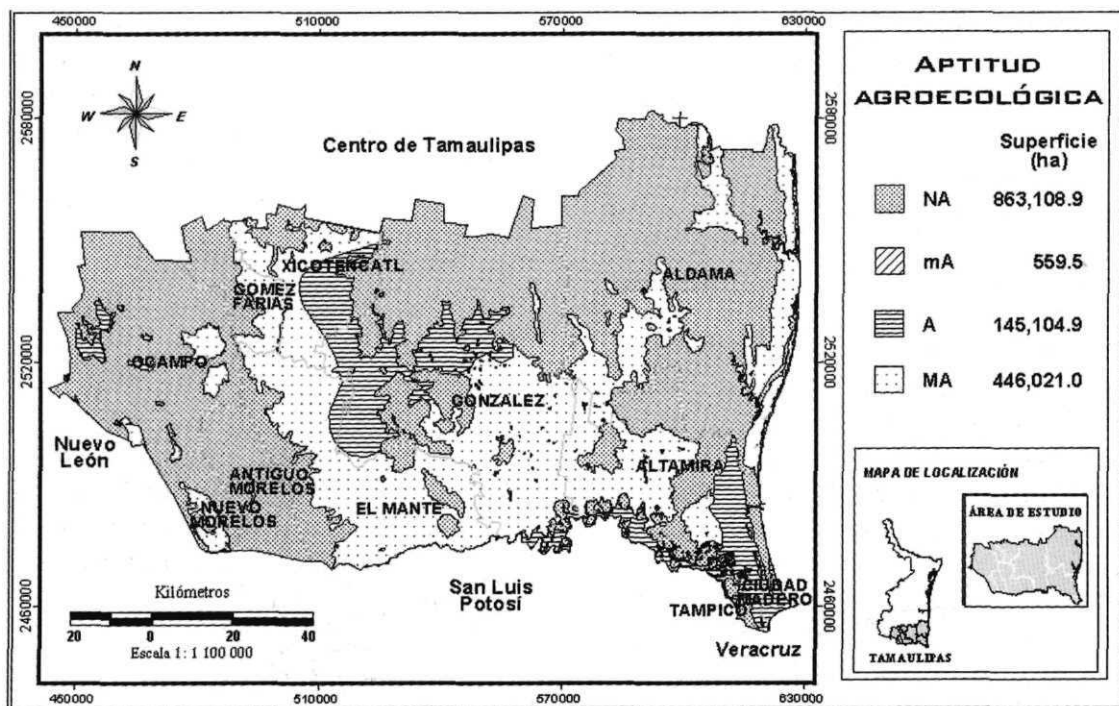


Figura 3. Zonificación agroecológica para el cultivo de la caña de azúcar en el sur de Tamaulipas, México.

sa y pendientes menores al 8%.

En la Figura 3 se puede apreciar que el municipio más idóneo para el cultivo de la caña de azúcar fue Mante, ya que un 71.0% de su territorio (120 699.7 ha) se clasificó como MA representando el 26.3% del total de la superficie de esta clase (Cuadro 4). Otro municipio que presentó un alto porcentaje en superficie clasificado como MA fue Xicoténcatl, con el 46.4% de su territorio (38 906.5 ha). A excepción de estos dos municipios, todos los restantes presentaron superficies inferiores al 40% dentro de esta misma clase; entre las más altas estuvieron Gómez Farias (39.4%), Altamira (38.7%), González (31.1%) y Nuevo Morelos (27.4%).

La clase A indica áreas donde el rendimiento máximo esperado puede ser restringido. Agroclimáticamente se satisfacen de entre un 40 a un 80% las necesidades hídricas. En esta categoría se localizan suelos que presentan alguna restricción para el cultivo, principalmente por Unidades como fueron: Cambisoles gleycos (Bg) y Regosoles calcáreos (Rc), los cuales son suelos muy débilmente o no desarrollados que presentan acumulación de arcilla y poseen alta susceptibilidad a la erosión lo que ocasiona pérdida de materia orgánica y nutrientes del suelo.

El área representada por esta clase fue de 145 104.9 ha (9.9%), misma que se distribuyó en el centro y sureste de la zona en estudio. Los municipios que presentaron las más altas superficies clasificadas dentro de esta clase fueron: Cd. Madero (92.7%), Tampico (59.5%) y Xicoténcatl (25.5%) de su superficie, respectivamente (Cuadro 4).

La clase mA representa las zonas donde se tienen restricciones tanto de clima como de suelo y los rendimientos a obtenerse serán de un 20 a un 40%. La extensión cubierta por

esta clase correspondió sólo a 559.5 ha, distribuidas específicamente en el municipio de Ocampo. La restricción en esta clase fue por Pendientes, debido a que se encontraron valores entre el 8.0 y 30%.

La clase NA representó las áreas que no son propicias para el cultivo de la caña de azúcar. En la zona en estudio, esta clase quedó determinada principalmente por las Unidades de suelo: Litosoles, Luvisoles, Gleysoles y Solonchak, la mayoría de estos suelos son poco profundos y con bajo contenido de materia orgánica. Además, la última Unidad Solonchak presenta un alto contenido de salinidad y pedregosidad. Las Fases de suelo que influenciaron para que la zona se clasificara como NA, fueron la Pedregosa y la Petrocálcica. La Textura gruesa característica de estos suelos degradó a la clasificación agroclimática, además de que se presentaron Pendientes de suelo superiores al 30%. La superficie clasificada dentro de esta aptitud fue de 863 108.9 ha (59.3%).

Las zonas más afectadas con esta clase de aptitud se ubicaron al oeste y este. En la zona oeste, los municipios que resultaron en su mayor parte NA para el cultivo de la caña de azúcar fueron Antiguo Morelos (97.9%), Ocampo (94.8%), Nuevo Morelos (72.0%) y Gómez Farias (60.6%), del total de su superficie. Dentro del noreste, los municipios de Aldama y González presentaron las superficies más altas, con 280 462.5 (76.4%) y 174 107.8 (49.8%) ha, respectivamente.

CONCLUSIONES

Uno de los aspectos más importantes que debe tener en cuenta cualquier agricultor debe ser el clima, debido a la influencia que éste tiene sobre el crecimiento y desarrollo de la planta. Sin embargo, no basta con analizar

Cuadro 4. Superficie municipal por aptitud agroecológica para la caña de azúcar

| Municipio | | NA | mA | A | MA | Superficie |
|---------------|----|-----------|-------|----------|-----------|------------|
| Aldama | ha | 280 462.5 | 0 | 1 538.4 | 84 864.4 | 366 865.3 |
| | % | 76.4 | 0 | 0.4 | 23.1 | 100 |
| Altamira | ha | 67 601.2 | 0 | 34 670.2 | 64 509.3 | 166 780.8 |
| | % | 40.5 | 0 | 20.8 | 38.7 | 100 |
| Ant. Morelos | ha | 54 936.1 | 0 | 17.3 | 1 176.2 | 56 129.6 |
| | % | 97.9 | 0 | 0 | 2.1 | 100 |
| Ciudad Madero | ha | 339.2 | 0 | 4 318.3 | 0 | 4 657.5 |
| | % | 7.3 | 0 | 92.7 | 0 | 100 |
| Mante | ha | 44 455.7 | 0 | 4 728.3 | 120 699.7 | 169 883.6 |
| | % | 26.2 | 0 | 2.8 | 71.0 | 100 |
| Gómez Farias | ha | 26 216.6 | 0 | 10.2 | 17 024.3 | 43 251.1 |
| | % | 60.6 | 0 | 0 | 39.4 | 100 |
| González | ha | 174 107.8 | 0 | 66 668.4 | 108 539.4 | 349 315.7 |
| | % | 49.8 | 0 | 19.1 | 31.1 | 100 |
| Nvo. Morelos | ha | 20 709.1 | 0 | 177.8 | 7 866.1 | 28 753.0 |
| | % | 72.0 | 0 | 0.6 | 27.4 | 100 |
| Ocampo | ha | 167 078.7 | 551.1 | 6 117.4 | 2 435.0 | 176 182.2 |
| | % | 94.8 | 0.3 | 3.5 | 1.4 | 100 |
| Tampico | ha | 3 722.4 | 0 | 5 470.5 | 0 | 9 192.9 |
| | % | 40.5 | 0 | 59.5 | 0 | 100 |
| Xicoténcatl | ha | 23 479.6 | 8.4 | 21 388.0 | 38 906.5 | 83 782.4 |
| | % | 28.0 | 0 | 25.5 | 46.4 | 100 |

sólo al clima como factor indicativo de un cultivo, sino que es necesario estudiar, además, al suelo y al cultivo como un sistema integrado. En esta investigación se detectó que, de analizarse sólo al clima (zonificación agroclimática), se tendría que tanto el 86.9 como el 13.1% de la zona sur de Tamaulipas resultaron con características MA y A para la caña de azúcar, sin embargo, al analizar las variables de Unidades, Fases, Texturas y Pendientes de suelos, se encontró que sólo el 40.0% del territorio se consideró como A para el cultivo.

De manera general, se puede mencionar

que las principales limitaciones agroecológicas para el cultivo de la caña de azúcar en el sur de Tamaulipas, correspondieron a las características de las Unidades de suelo. Al respecto, se encontró que la contribución de esta variable edáfica fue de un 34.9 % en la clase NA, mientras que, en conjunto, la contribución por Fases, Texturas y Pendiente de suelo fue sólo del 24.4%. La superficie clasificada dentro de las zonas MA, A y mA, se redujo a un 40.7%, clasificadas dentro de las mismas aptitudes en la zonificación agroclimática.

Finalmente, se puede señalar que existen grandes superficies clasificadas en las clases A y MA fuera de la región donde actualmente se cultiva la caña de azúcar, las cuales pudieran ser utilizadas para su siembra, debido a que se tienen los recursos biofísicos tanto de clima como de suelo, necesarios para un buen desarrollo del cultivo. Otro punto a resaltar, es que gran parte de la superficie asignada a la agricultura de riego se clasificó como una zona MA, dentro de la zonificación agroecológica, donde se tiene un índice de Satisfacción de las Necesidades Hídricas de entre un 80 y 100%, y si se toma en consideración que la caña de azúcar debe someterse a una sequía relativa (disminuir la aplicación de agua al cultivo) durante la etapa de madurez, entonces, la asignación de riegos a aplicarse en estas zonas debe ser sumamente cuidadosa, debido a que se pondría en peligro la calidad de la producción, además de que se estaría desperdiciando el recurso hídrico, el cual podría asignarse a otros usos.

REFERENCIAS

- Arellano, M. J. L. L. (1994), *La degradación del suelo por erosión hídrica en Chiapas: evaluación y principios tecnológicos para su control*, tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma de Chapingo, Estado de México.
- Bogaert, P. (1995), *The spatial interpolation of agroclimatic data (Cokriging software an Source code)*, User manual, FAO, Roma.
- Bosque, S. J. (2000), *Sistemas de Información Geográfica*, Editorial Rialp, 2ª ed., Madrid, España.
- Campos, A. D. F. (1987), *Procesos del ciclo hidrológico*, Editorial Universitaria Potosina, vol I, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México, pp. 4-16.
- Carbonell, J., A. Amaya, B. V. Ortiz, J. S. Torres, R. Quintero y C. H. Isaacs (2001), *Zonificación agroecológica para el cultivo de la caña de azúcar en el Valle del río Cauca. Tercera aproximación*, Centro de Investigaciones de la Caña de Azúcar de Colombia, Serie técnica no. 29, Cali, Colombia.
- Carmona, J. A y R. J. Monsalve (2000), "Sistemas de Información Geográfica", *Monografías, com*.
- Chuvieco, S. E. (2002), *Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el espacio*, Ariel, Barcelona, España.
- COAAZUCAR (Comité de la Agroindustria Azucarera; 2002), *Resultados de la zafra 2001-2002*, <http://www.sagarpa.gob.mx/Coaazucar>.
- Cristóbal, A. D., V. O. Palacios y F. F. Ruiz (1996), "Comparación de métodos de interpolación en variables hídricas del suelo", *Agrociencia*, vol 30, núm. 3, pp. 329-343.
- Demey, R. J. y Pradere, R. (1996), "Generación de isolíneas de precipitación al sur del Estado de Aragua-Venezuela usando Kriging con tendencia externa", *Agronomía Tropical*, vol 46 núm. 3, pp. 313-333.
- Díaz, H. B. M, V. H. Plascencia, R. R. Arteaga y P. M. Vázquez (2000), "Estudio y zonificación agroclimáticos en la región Los Altos de Chiapas, México", *Investigaciones Geográficas*, Boletín, núm 42, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 7-27.
- Eastman, J. R. (1992), *IDRISI. Technical reference. Clark University-Graduate school of Geography, Worcester, Massachusetts, USA*.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations; 1978), "Report on the Agroecological zones project. Methodology and results for Africa", *World soils resources*, Report 48. Roma, Italia.

- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations; 1997), "Zonificación agroecológica. Guía general", *Boletín de suelos*, núm. 73, Servicio de Recursos, Manejo y Conservación de Suelos, Dirección de Fomento de Tierras y Aguas, Roma, Italia.
- Fernández, P. J. M. y L. M. A. Sumano (1992), *Introducción a los Sistemas de Información Geográfica*, Universidad Autónoma de Baja California, Baja California, México.
- Figueroa H. F. (1991), *Evaluación de variables meteorológicas y rendimientos de caña de azúcar en la región de la Huasteca Potosina, con fines de planeación*, tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados, Centro de Agrometeorología, Montecillo, México.
- García, E. A. (1973), *Manual de campo en caña de azúcar*, Comisión Nacional de la Industria Azucarera (CNIA), Instituto para el Mejoramiento de la Producción de Azúcar (IMPA), México.
- González A. C. R. (1988), *Aplicación del método Kriging al cálculo de la precipitación pluvial*, tesis de Licenciatura, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente, Guadalajara, Jalisco.
- Herrera, S.S. (1999), *Diseño de una red óptima de observación de variables climáticas, aplicando un enfoque geoestadístico*, tesis de Maestría, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, México.
- INEGI (2003), *México en el mundo*, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.
- INEGI (1982), *Síntesis cartográfica del estado de Tamaulipas. Anexo cartográfico*, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.
- Martínez, G. A. y A. D. Martínez (1996), "Método de cómputo para pronosticar la época de zafra en caña de azúcar con base a datos de temperatura y precipitación", *Agrociencia*, vol 30, núm. 4, pp. 487-494.
- Namuche V.J.R. (1983), *Modelos empíricos para predecir rendimientos relativos en caña de azúcar en base a variables agroclimáticas y de manejo*, tesis de Maestría en Ciencias, Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de México.
- Nozica, G., M. Herique y R. Porcel (1997), *Sistemas de Información Geográfica*.
- Parra, V. J. G. (1989), *Zonificación agroclimática para la producción de la caña de azúcar en algunos estados de México*, tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados, Centro de Edafología, Montecillo, Estado de México.
- Ponce, H. R. (1994), "La zonificación Ecológica-Económica de la Amazonia y los sistemas de información geográfica", *Memorias II Reunión Regional (zonificación Ecológica-Económica; instrumento para la conservación y el desarrollo sostenible de los recursos de la Amazonia)*, Lima, Perú.
- Ruiz, V. J. (1998), "Zonificación agroecológica del maíz de temporal en los valles centrales de Oaxaca. I. Determinación del potencial productivo", *Terra*, vol. 16, núm 3, pp. 269-275.
- Silva, F. P. (1994), *Variación espacial de unidades calor durante el periodo de crecimiento hídrico en la República Mexicana*, tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma de Chapingo, Estado de México.
- Tijerina, C. L. y S. C. A. Ortiz (1990), *Manual de la metodología para evaluar la aptitud de las tierras para la producción de cultivos básicos en condiciones de temporal. Programa de Agrometeorología*, Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de México.
- Villa, C. M. M., I. M. A. Inzunza y V. E. Catalán (2001), "Zonificación agroecológica de hortalizas involucrando grados de riesgo", *Terra*, vol 19, núm 1, pp. 1-7.