

DELIMITACIÓN DE ÁREAS ADECUADAS PARA CULTIVOS DE ALTERNATIVA: UNA EVALUACIÓN MULTICRITERIO-SIG

Delineation of Suitable Areas for Alternative Crops: A Multicriteria-GIS Evaluation Approach

Alejandro P. Ceballos-Silva¹ y Jorge López-Blanco^{2‡}

RESUMEN

Se delimitaron las áreas adecuadas para los cultivos de alternativa amaranto y nopal, utilizando el enfoque de evaluación multicriterio-SIG, en el distrito de desarrollo rural Toluca, estado de México mediante la integración de información biofísica de clima, suelo, relieve y uso/ cobertura del suelo. Se encontraron 1048 ha con alto potencial para el cultivo de amaranto y 4747 ha para el cultivo de nopal, lo cual es promisorio considerando que la mayor parte de esas áreas están en terrenos con degradación física del suelo y de agricultura de temporal.

Palabras clave: *cultivos de temporal, amaranto, nopal, potencial productivo.*

SUMMARY

The suitable areas for the alternative crops amaranth and prickly pear were delimited in the rural development district of Toluca, state of Mexico, by means of a multicriteria-GIS evaluation approach using biophysical databases of climate, soil, relief and land use/cover. We found 1048 ha with high potential for cultivating amaranth and 4747 ha for prickly pear. These results are promising considering that the bulk of those areas are located on lands with physical degradation of soil and rain-fed agriculture.

Index words: *rain-feed crops, amaranth, nopal, productive potential.*

¹ INIFAP, Campo Experimental Zacatepec. Km. 0.5 Carretera Zacatepec-Galeana. 62780 Morelos, México.

² UNAM, Instituto de Geografía. Circuito Exterior. Cd. Universitaria. 04510 México, D.F.

[‡] Autor responsable (jlopezblanco@hotmail.com)

Recibido: enero de 2005. Aceptado: septiembre de 2009.
Publicado como nota de investigación en
Terra Latinoamericana 28: 109-118.

INTRODUCCIÓN

La agricultura es una de las actividades más importantes de utilización del sistema natural y debe ajustarse a las áreas más aptas para ello (García *et al.*, 2000). La estimación del potencial de ese sistema con fines agrícolas está determinada, entre otros aspectos, por la evaluación de los factores biofísicos, suelo, clima y relieve (Kutter *et al.*, 1997; Baca *et al.*, 1992). En este contexto, la identificación y la caracterización precisa del potencial productivo de las áreas agrícolas, son vitales para la investigación y el desarrollo agrícola, debido a su enorme efecto en la transferencia de las innovaciones agro-tecnológicas (Corbett, 1996).

El enfoque científico-tecnológico más útil para la delimitación de las áreas adecuadas para cultivos tradicionales y de alternativa, es la de los sistemas de información geográfica (SIG). Sin embargo, la funcionalidad de los SIG en la solución de los problemas de selección de áreas para diferentes usos, se ve limitada cuando se emplea el enfoque de sobreposición determinística de mapas (Janssen y Rietved, 1990). Lo anterior plantea la conveniencia de tratar esa delimitación como un problema de evaluación multicriterio (EMC). La toma de decisiones con EMC es un proceso basado en un conjunto de conceptos, modelos y métodos para describir, evaluar, jerarquizar, elegir o rechazar alternativas, con base en una valoración expresada por intensidades de preferencia, de acuerdo con diversos criterios (Barredo, 1996).

La utilización de las técnicas de EMC en SIG ayudan a los usuarios a mejorar el proceso de toma de decisiones (Carver, 1991) y resultan útiles para resolver situaciones de conflicto de individuos y de grupos (Malczewsky, 1996; Janssen y Rietved, 1990).

En el estado de México, una de las áreas con mayor importancia dentro de la actividad agrícola es el Distrito de Desarrollo Rural (DDR) Toluca, el cual de acuerdo con SAGAR (1998), tiene una extensión de 302 604 ha, de las cuales 153 167 ha (50.6%) son de agricultura de temporal y 8530 ha (2.8%) corresponden con áreas

erosionadas. Estas áreas degradadas son terrenos que deben ser considerados, no necesariamente desde un punto de vista de explotación intensiva, sino de conservación del suelo.

En el DDR Toluca no se han reportado siembras comerciales de esos cultivos, sin embargo para el caso del nopal, existen en el área plantaciones de traspatio, como límites parcelarios o en las orillas de los caminos. En el contexto planteado, el objetivo de este trabajo fue delimitar las áreas adecuadas para cultivos alternativos (amaranto y nopal), en el DDR Toluca, mediante el enfoque de evaluación multicriterio-SIG y utilizando la integración de información disponible de clima, suelo, relieve y uso/cobertura del suelo.

Los cultivos fueron elegidos porque, en el primer caso, en la región central de México, el amaranto juega un papel de importancia económica y permanece como fuente potencial de germoplasma susceptible de ser aprovechado para la producción de granos a través de la agricultura tradicional o tecnificada, además del alto valor nutritivo de su semilla, sus potencialidades agrícolas y de industrialización, lo hacen una excelente alternativa para la agricultura y la alimentación en México. En el segundo caso, el cultivo del nopal puede ser un recurso importante en la economía rural y de las zonas degradadas, por los altos rendimientos que se pueden obtener de la tuna, si se siembra en superficies que no cuentan con una precipitación pluvial adecuada, para el cultivo de otras especies más exigentes, en términos de agua y suelo. En este trabajo se explora el potencial del nopal y el amaranto como cultivos de alternativa, sobre todo en aquellas áreas que tienen condiciones extremas o limitantes para otros cultivos anuales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

El DDR Toluca está localizado entre las latitudes 19°01'N y 19°31'N y entre las longitudes 99°15'O y 99°57'O (Figura 1). Es una depresión tectónica alargada, cubierta con sedimentos lacustres y aluviales, delimitada por una serie de fallas regionales que han sido expresadas por los eventos volcánicos masivos del pleistoceno temprano. El DDR está diferenciado por 3 tipos climáticos: 1) templado sub-húmedo, 2) templado semi-frío y sub-húmedo y 3) frío (con temperatura media anual entre -2 y 5 °C; IIIGEC, 1993). El intervalo de altitud varía entre 1800 y 4640 m de altura.

La vegetación natural es predominantemente de bosque de pino, bosque mixto (pino-encino) y bosque de oyamel. Los bosques están mezclados con áreas de pastizal inducido y chaparral (IIIGEC, 1993).

El procedimiento general seguido en este trabajo fue: 1) La obtención de la base de datos de clima, suelo y relieve y la verificación de esta información para la eliminación de los errores e inconsistencias. 2) La interpolación de la información de clima y suelo, el ajuste de los mapas de temperatura de acuerdo con el gradiente térmico local, la preparación y el procesamiento de las bases de datos, incluyendo la imagen Landsat TM, para obtener el mapa de uso/cobertura del suelo. 3) La aplicación de la EMC usando los criterios relevantes para delimitar las áreas adecuadas para los cultivos de alternativa.

Base de Datos de Clima

La información de clima se obtuvo de 35 estaciones ubicadas dentro y en las cercanías del área de estudio. Sus periodos de observaciones están en el intervalo de los 24 a los 42 años. La información fue evaluada para eliminar inconsistencias, datos no útiles y estimar valores faltantes. Las variables climáticas consideradas fueron: temperatura máxima, temperatura mínima, precipitación y evaporación. La razón de uso de estas variables estriba en que son consideradas como las más importantes en cuanto a su efecto en el comportamiento productivo y reproductivo (capacidad de floración y conversión a frutos). Además de que existe una carencia de información sobre los requerimientos ambientales específicos de muchos cultivos, como en este caso nopal y amaranto.

Durante la preparación de los datos de clima se utilizó el criterio de que al faltar más del 30% de los datos diarios de un mes, ese mes no se consideraba. La estimación de los datos faltantes se realizó a partir del cálculo de la media de los 5 días anteriores y posteriores al dato faltante. El método usado para estimar datos faltantes se calibró con una prueba de desviación estándar (DE). Se comparó la DE utilizando datos de días contiguos (del mismo mes) y la estimada con los datos del mismo día pero de diferentes años, con la primera opción se tuvieron valores menores de DE.

Para realizar la interpolación de la información climática se utilizó el método de la distancia ponderada promedio, el cual tiene la ventaja de que es un método exacto (Bosque, 1992; Eastman, 1997), es decir,

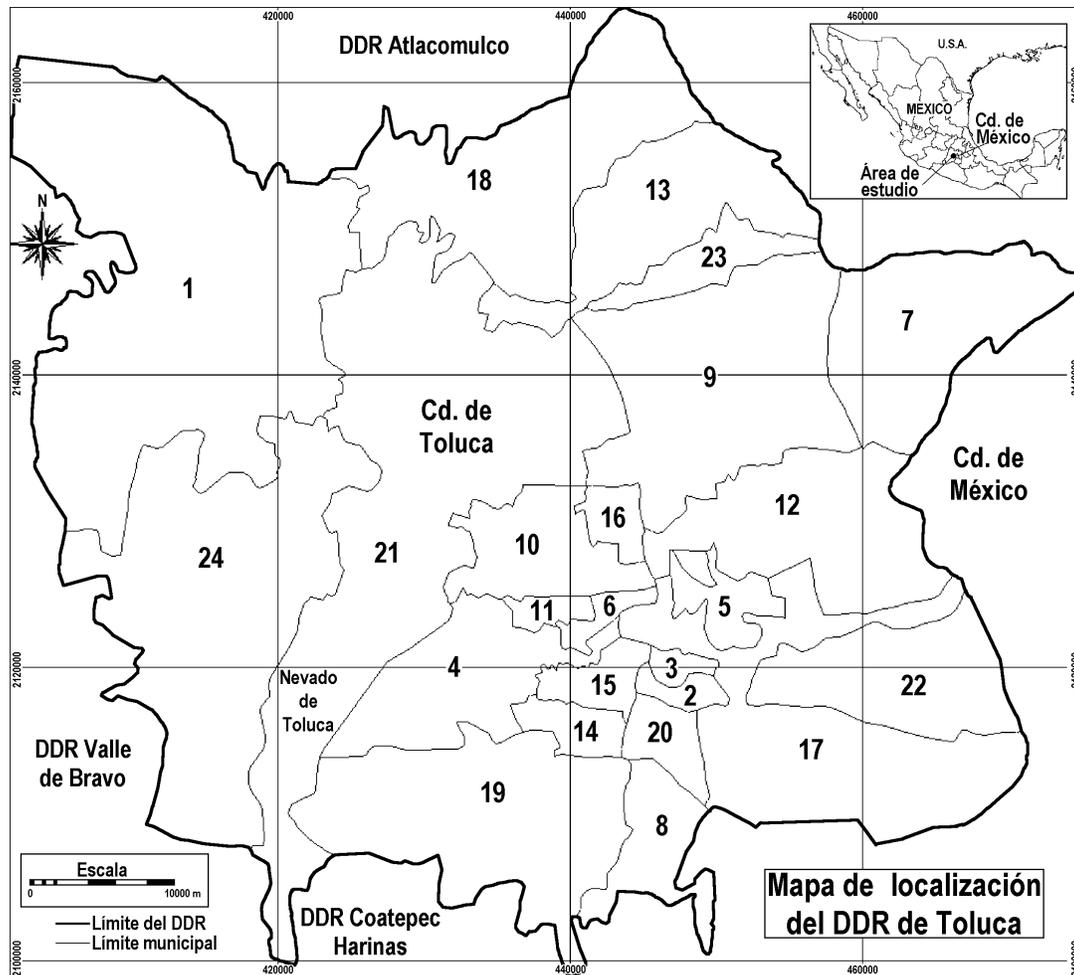


Figura 1. Localización del área de estudio, el distrito de desarrollo rural (DDR) Toluca. Los municipios son: 1 = Almoloya de Juárez, 2 = Almoloya del Río, 3 = Atizapán, 4 = Calimaya, 5 = Capulhuac, 6 = Chapultepec, 7 = Huixquilucan, 8 = Joquicingo, 9 = Lerma, 10 = Metepec, 11 = Mexicalcingo, 12 = Ocoyoacac, 13 = Otzolotepec, 14 = Rayón, 15 = San Antonio la Isla, 16 = San Mateo Atenco, 17 = Santiago Tianguistenco, 18 = Temoaya, 19 = Tenango del Valle, 20 = Texcalyacac, 21 = Toluca, 22 = Xalatlaco, 23 = Xonacatlán, 24 = Zinacantepec.

el resultado de la interpolación reproduce en los puntos de muestra, exactamente sus valores originales. Sin embargo, la desventaja de este método, a diferencia de las técnicas geoestadísticas de interpolación, es que las estimaciones no consideran la variabilidad espacial de los datos, por lo que pueden tener sesgos.

Aun así, los mapas resultantes no reflejaban adecuadamente los cambios que sufren las temperaturas máximas y mínimas, al cambiar de altitud, por lo que se realizó un ajuste mediante la obtención de un gradiente térmico local, derivado a partir de un modelo de regresión, que tomó en cuenta la altitud y la temperatura de 72 estaciones meteorológicas ubicadas en áreas representativas del estado de México. Una vez obtenido el gradiente, fue aplicado a cada uno de los mapas de temperatura máxima y mínima. Finalmente se obtuvieron

36 mapas primarios (uno por cada decena) para cada una de las 4 variables de clima consideradas en este estudio, esto es, 144 mapas en total.

Base de Datos de Suelo y Relieve

La información del suelo fue obtenida a través de varias fuentes e incluyó: 1) profundidad, variable que se generó mediante la digitización de los polígonos de la fase física, impresos en las diez cartas edafológicas que cubren el área de estudio, a escala 1:50 000 del INEGI (varias fechas). 2) las propiedades físicoquímicas se obtuvieron de un muestreo realizado entre 1993 y 1994 por la SAGAR y la Secretaría de Fomento Agropecuario del Estado de México (INIFAP, 1994). Este muestreo fue realizado sólo para el área agrícola del DDR

(150 000 ha aprox.) siguiendo una retícula de 1 km por 1 km. Las variables medidas fueron: pH, materia orgánica, fósforo, potasio, calcio, magnesio, arena, limo y arcilla.

La construcción del mapa de clasificación textural se llevó a cabo a partir de un método geométrico que se basa en la forma del triángulo de texturas, el cual determina a qué clase corresponde cualquier punto en el terreno, con respecto a sus valores integrados de arena, limo y arcilla. La información de las pendientes del terreno (en %) y de la altitud (en m) fue obtenida a partir del modelo de elevación digital (MED). Su resolución espacial fue de 3 segundos de arco, en coordenadas geográficas, lo cual corresponde aproximadamente con un tamaño de píxel de 90 m (INEGI, 1994).

Uso / Cobertura del Suelo y Procesamiento de la Imagen

Para obtener la información del uso/cobertura del suelo se procesó una imagen Landsat TM, de marzo de 1996, de la cual sólo se seleccionó el área de interés (2318 X 2410 píxeles). El tamaño del píxel fue de 30 m y se tomaron en cuenta 6 bandas (de la 1 a la 5 y la 7). La imagen fue georreferida en coordenadas UTM, y además se le realizó un análisis de componentes principales (ACP) para evaluar la variabilidad contenida en las bandas.

Posteriormente, dentro del proceso de clasificación supervisada y a partir de la delimitación en pantalla de campos de entrenamiento, detectando áreas homogéneas en los compuestos en color construidos con la combinación de 3 bandas de la imagen, se realizó el agrupamiento estadístico automático a partir de la aplicación del algoritmo de máxima verosimilitud.

Esto tuvo como objetivo obtener un mapa de uso/cobertura del suelo que mostrara las principales clases de información presentes en el área. La clasificación resultante fue evaluada para obtener las matrices de error espectral y de error real, para determinar su exactitud (Lillesand y Kiefer, 1994). Una vez obtenido el mapa se hizo un remuestreo a un tamaño de píxel de 90 m, para homogeneizar la resolución espacial de todas las capas de información.

Evaluación Multicriterio (EMC)

Se realizó una revisión amplia de la documentación disponible sobre los requerimientos ambientales biofísicos

que favorecen el crecimiento y el desarrollo óptimo de los cultivos alternativos elegidos (FAO, 1998). En la entrevista con los expertos de cultivo para la construcción de la matriz de comparación pareada (MCP), se llevó a cabo la identificación de las variables del medio biofísico más importantes para la delimitación de las áreas adecuadas para los cultivos de amaranto y nopal, así como su jerarquización por nivel de importancia.

Posteriormente se llevó a cabo la construcción de la MCP utilizando la escala de valoración continua de Saaty (1980). Este método emplea una escala con valores de 1/9 (extremadamente menos importante) al 9 (extremadamente más importante), para valorar la importancia relativa entre 2 criterios a la vez (Malczewski, 1999). Este método ha sido probado, teórica y empíricamente, para una diversidad de estudios incluyendo la toma de decisiones sobre la localización de áreas o sitios con diferentes propósitos (Lai y Hopkins, 1995; Siddiqui *et al.*, 1996; Malczewski *et al.*, 1997; Díaz-Salgado y López-Blanco, 2000; Ceballos-Silva y López-Blanco, 2003a, b).

A continuación, junto con los expertos, se definieron los intervalos de las variables o criterios identificados como relevantes, los cuales se revisaron para que fuesen consistentes con la información obtenida en la fase previa de los requerimientos ambientales.

Construcción de los mapas-criterio y de áreas adecuadas. Dado que los mapas interpolados de clima, suelo y relieve poseen diferentes escalas de medida, la EMC requiere que los valores contenidos en los mapas-criterio sean estandarizados o transformados a unidades comparables (Malczewski, 1999). Existen varios caminos que pueden ser seguidos para hacer a los mapas-criterio comparables entre sí. El enfoque de función de membresías fuzzy fue utilizado y permitió realizar la estandarización tanto de los mapas interpolados continuos, como de los categóricos, generando así mapas-criterio que representan más objetivamente las transiciones graduales del espacio (Ceballos-Silva y López-Blanco, 2003b).

Los conjuntos fuzzy son agrupaciones sin límites tajantes, esto es, la transición entre la membresía o pertenencia y la no membresía o no pertenencia de un elemento en el conjunto es gradual (Eastman, 1999; Malczewski, 1999), lo cual permite que los elementos pertenezcan parcialmente a múltiples conjuntos. De este modo la lógica fuzzy es útil para describir la transición de clases en el mundo real.

Un conjunto fuzzy está caracterizado por un grado de membresía (también llamado posibilidad) que varía entre 0.0 y 1.0, indicando un incremento continuo desde la no membresía hasta la membresía completa (Eastman, 1999). Utilizando el procedimiento FUZZY de Idrisi, se realizó la estandarización de los mapas-criterio. Para cada criterio, el nivel de membresía 0.0 se asignó al nivel de requerimiento ambiental considerado como de muy baja potencialidad, por el contrario, el valor 1.0 se asignó al de muy alta potencialidad.

Para los mapas-criterio categóricos (profundidad y textura de suelo) se definieron 5 categorías de potencialidad: muy bueno (5), bueno (4), medio (3), bajo (2) y muy bajo (1). El grado de membresía para cada categoría se definió usando números fuzzy (Malczewski, 1999). De este modo fueron construidos todos los mapas-criterio estandarizados y dado que el procedimiento de EMC utilizado requiere que los niveles de los criterios sean números enteros, se produjeron mapas con valores de entre 0 y 255 escalados linealmente.

Asimismo se construyó el mapa bit de restricción (valores 0 ó 1), el cual consideró como 0 (no apto para ser evaluado): los cuerpos de agua permanentes, las cumbres volcánicas, las ciudades y las áreas inundadas. Posteriormente se calcularon los pesos de importancia relativa para cada uno de los mapas-criterio. Dichos pesos se obtuvieron del cálculo del eigenvector principal de la matriz de comparación pareada, utilizando el procedimiento WEIGHT disponible en Idrisi. También se calculó el índice de consistencia, que indica la probabilidad de que las valoraciones de la matriz fueran generadas aleatoriamente (Saaty, 1980).

Una vez que se obtuvieron los mapas-criterio estandarizados, así como sus pesos y los mapas restricción, se aplicó el procedimiento MCE de Idrisi, que utiliza la sumatoria lineal ponderada para obtener los mapas de áreas adecuadas para los cultivos de alternativa. Este procedimiento es uno de los más utilizados en la EMC (Eastman *et al.*, 1995; Jankowski, 1995). Posteriormente se realizaron nuevamente entrevistas con los expertos de los cultivos. El propósito fue 1) analizar conjuntamente los resultados alcanzados, poniendo énfasis en la definición de los intervalos específicos para cada criterio, 2) así como en la veracidad de la identificación de las áreas adecuadas para los cultivos, para lo cual se generó una tabla, producto del cruzamiento del mapa de uso/cobertura del suelo y el de áreas adecuadas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se obtuvieron 36 mapas, correspondientes a valores medios decenales para las 4 variables climatológicas. El gradiente de temperatura fue de $-0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$, por cada 100 m de incremento de altitud. El mapa criterio de profundidad de suelos se obtuvo mediante el procedimiento RECLASS de Idrisi, asociando los niveles de profundidad, como niveles de potencialidad para uso agrícola: nivel 5 ($> 1\text{ m}$), nivel 4 ($> 0.5\text{-}1\text{ m}$), nivel 3 ($> 0.1\text{-}0.5\text{ m}$), nivel 2 ($> 0.1\text{-}0.5\text{ m}$ en fase gravosa) y nivel 1 ($< 0.1\text{ m}$).

Para el DDR resultó que el nivel 5 de potencialidad tuvo el 62% del área (163 879 ha) y el Nivel 4 el 26% (67 380 ha), lo cual indica que en la mayor parte del DDR, el suelo presenta una profundidad apropiada ($> 0.5\text{ m}$) para el desarrollo de diversos cultivos. Considerando que los requerimientos del medio biofísico para el óptimo desarrollo de los cultivos están definidos en términos de su clase textural, en el área de estudio se encontró que un gran porcentaje (más del 94.5%) tiene textura franca y franco-arenoso, las cuales son adecuadas también para una gran cantidad de cultivos. Como resultado de procesar la información del factor relieve, se generaron los mapas de altitud y de pendientes a partir del procesamiento del MED en el SIG.

Uso / Cobertura del Suelo y Procesamiento de la Imagen

El análisis de componentes principales (ACP), mostró que los 2 primeros componentes explican el 95% de la varianza de las 6 bandas, los cuales se pueden usar como representativos de la variabilidad de la imagen. Los resultados obtenidos en la clasificación supervisada muestran que la clase agricultura de humedad y riego, incluyó áreas con humedad disponible, que permite el establecimiento de algún cultivo de ciclo corto, aprovechando la presencia de mantos freáticos someros y áreas con riego permanente.

En ambos casos, esta clase espectral fue diferenciada gracias a la respuesta de la vegetación mostrada en el compuesto 4/3/1 en áreas agrícolas, las cuales fueron validadas mediante fotointerpretación y con recorridos de campo. Las áreas con degradación física, se asociaron a espacios con problemas de erosión antrópica. Los mejores resultados de la clasificación se obtuvieron usando valores umbrales de distancia

euclidiana entre 20-25, sobre todo al utilizar el algoritmo de agrupamiento de máxima verosimilitud.

En la estimación de la exactitud de la clasificación, se observó un comportamiento homogéneo en cuanto a los errores de omisión y comisión. Para el caso de la agricultura de temporal resultó que una gran cantidad de píxeles de esta clase fueron correctamente clasificados, al igual que en las clases agricultura de riego, áreas urbanas y agua. La exactitud general fue alta (76.5%) y el estadístico κ (Khat) fue de 0.71, esto es, que la clasificación supervisada llevada a cabo fue 71% mejor que si se hubiese realizado una asignación al azar de los valores de los píxeles (Lillesand y Kiefer, 1994).

Evaluación Multicriterio para el Cultivo de Amaranto

Construcción de la matriz de comparación pareada y estimación de los pesos. El eigenvector de pesos derivado de las valoraciones otorgadas en la matriz de comparación pareada, mostró que los criterios más importantes para delimitar a las áreas adecuadas para amaranto fueron: la temperatura mínima (0.2904), la precipitación (0.2144), la pendiente del terreno (0.2098) y la altitud (0.1217). Asimismo, los criterios con menor importancia fueron: temperatura máxima (0.0163), el pH del suelo (0.0267), la textura del suelo (0.0439) y la profundidad del suelo (0.0769). El eigenvector también mostró consistencia en las valoraciones otorgadas para la construcción de la MCP, ya que el índice obtenido fue de 0.07, el cual se encuentra dentro del límite óptimo definidos por Saaty (1980).

Definición de niveles específicos de factores y construcción de mapas-criterio. Las condiciones ambientales asociadas al nivel de potencialidad alta para el cultivo de amaranto están caracterizadas por: temperaturas mínimas mayores de 9 °C, durante el ciclo de cultivo abril-septiembre, con un intervalo de precipitación de 700-800 mm, también durante ese ciclo, pendiente menor del 5%, valores altitudinales menores a 2550 m de altura, suelos profundos de textura franca y con pH neutro, y finalmente, con una temperatura máxima de entre 17 y 23 °C. Por otra parte los niveles de potencialidad baja para este cultivo están asociados a temperaturas mínimas menores de 7.5 °C y temperaturas máximas menores de 17 °C, es decir áreas muy frías, pendientes mayores de 15%, suelos poco profundos y texturas muy arenosas o muy arcillosas y con pH ácido o alcalino.

Los niveles anteriores fueron la base para definir el grado de membresía (GM) fuzzy para cada uno de los factores en estudio. De tal modo que los niveles considerados como óptimos, para el desarrollo del cultivo de amaranto, fueron asociados al GM fuzzy de 1.0 y los niveles considerados como no óptimos fueron asociados al GM de 0.0 (Cuadro 1).

Obtención del mapa de áreas adecuadas y cruzamiento con el mapa de uso / cobertura del suelo. Para este cultivo se consideraron como fuera de evaluación a todas las áreas con altitudes mayores a 3500 m de altura. Una vez que se obtuvieron tanto los mapas-criterio, como los mapas restricción, se realizó la EMC usando Idrisi, de este modo se obtuvo el mapa de áreas adecuadas para el cultivo de amaranto (Figura 2). Se observa en esta figura que las áreas con mayor potencialidad se delimitaron sobre la parte más baja del valle de Toluca, en áreas actualmente destinadas a la producción de maíz.

Estas áreas corresponden con parte de los municipios de Atizapán y San Antonio la Isla, y a las partes bajas del municipio de Santiago Tianguistenco. Las áreas con menor potencial fueron delimitadas en las partes altas, en las laderas de montaña, con mayor pendiente y con temperaturas mínimas más extremas. Se encontraron 1048 ha con potencial muy bueno para este cultivo, lo cual es promisorio tomando en cuenta que éste es un cultivo de alternativa, con posibilidades en el área de estudio.

Cuadro 1. Niveles usados para definir el grado de membresía fuzzy por factor para el cultivo de amaranto.

Grado de membresía fuzzy	No membresía	Membresía completa
Factor	0	1
Temperatura mínima (°C)	< 7.5	> 9.0
Temperatura máxima (°C)	< 17	> 23
Precipitación (mm)	< 650 ó > 900	700 - 800
Profundidad del suelo (m)	< 0.1 [†]	> 1.0
pH suelo	< 5.5 ó > 7.5	6-7
Textura del suelo	Arcilla, arcilla limosa, franco arcilloso, arena, arena francosa y franco limoso [†]	Franco
Altitud (msnm)	> 2650	< 2550
Pendiente (%)	> 15	< 5

[†] De acuerdo al enfoque de números fuzzy y variables lingüísticas (Malczewski, 1999) el grado de no membresía fuzzy fue definido como 0.2.

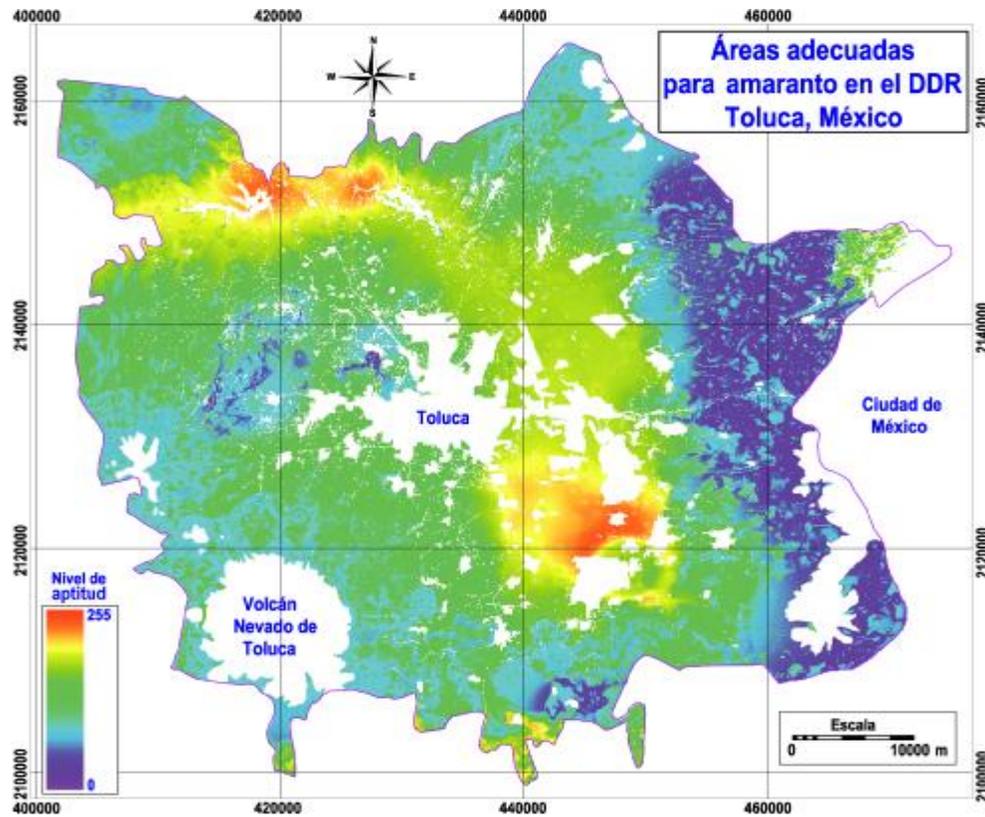


Figura 2. Mapa de áreas adecuadas para amaranto en el distrito de desarrollo rural (DDR) Toluca.

En el proceso de realimentación con los expertos de este cultivo, se argumentó que el potencial se puede ver limitado por la altitud del área, asociada con las bajas temperaturas. Lo anterior puede ser atenuado utilizando variedades de ciclo corto (mayo-septiembre), cuidando que las siembras se ubiquen en las áreas menos altas del DDR.

Existen referencias (Sánchez, 1988; Reyna y Carmona, 1994; Granados *et al.*, 2004) que reportan la adaptación de este cultivo a altitudes mayores incluso a 2800 m de altura. Los resultados anteriores fueron afinados al cruzar el mapa de áreas adecuadas de amaranto, con el mapa de uso/cobertura actual de suelo, proveniente del procesamiento de la imagen Landsat. Se encontró que la clase de agricultura de temporal presentó el nivel de potencialidad muy bueno en 959 ha, lo cual resulta promisorio sobre todo si se toma en cuenta que es un cultivo que actualmente no se siembra, además dicha cantidad representa casi el 50% de lo que actualmente se siembra con papa (2092 ha). También hay que destacar que el potencial de este cultivo se localizó en áreas de temporal y no de riego.

Evaluación Multicriterio para el Cultivo de Nopal

Construcción de la matriz de comparación pareada y estimación de pesos. De acuerdo con las valoraciones otorgadas en la MCP, el eigenvector de pesos mostró que los criterios más importantes para identificar las áreas adecuadas para nopal fueron: temperatura mínima (0.4056), altitud (0.1947), precipitación (0.1672) y profundidad del suelo (0.0841). Los criterios con menor importancia fueron: temperatura máxima (0.0172), pH del suelo (0.0373), pendiente del terreno (0.0376) y textura del suelo (0.0563). El índice de consistencia obtenido en la asignación de los pesos de la MCP (0.08) está dentro de los límites recomendados (< 0.10).

Definición de niveles específicos de factores y construcción de los mapas-criterio. Las condiciones ambientales asociadas al nivel de potencialidad alto en cuanto a aptitud para el cultivo de nopal, están caracterizadas por temperaturas mínimas anuales (ya que se trata de un cultivo perenne) mayores de 6.0 °C, con un intervalo altitudinal de menos de 2550 m,

precipitación de 800-900 mm anuales, pendiente entre 3-5%, suelos profundos de textura franca y con pH neutro y, con una temperatura máxima mayor a 20 °C. Los niveles bajos en cuanto a potencialidad para este cultivo, están asociados a temperaturas mínimas menores de 3.0 °C y temperaturas máximas menores a 12 °C, es decir, áreas muy frías, pendientes menores a 2% o mayores a 14%, suelos poco profundos y texturas muy arenosas o muy arcillosas y precipitaciones muy bajas. Los niveles anteriores fueron la base para definir el GM fuzzy para cada uno de los factores en estudio. De tal modo que los niveles considerados como óptimos, para el desarrollo del cultivo de nopal, fueron asociados al GM fuzzy de 1.0 y los niveles considerados como no óptimos fueron asociados al GM de 0.0 (Cuadro 2).

Obtención del mapa de áreas adecuadas y cruzamiento con el mapa de uso/cobertura de suelo.

Para el cultivo de nopal se consideraron como áreas fuera de evaluación las que tienen altitudes mayores a los 3500 m de altura. Una vez que se obtuvieron tanto los mapas-criterio, como los mapas restricción se realizó la EMC, obteniendo el mapa de áreas adecuadas para el cultivo de nopal (Figura 3).

En la Figura 3 se observa que las áreas con alto potencial para el cultivo de nopal se localizan principalmente en el valle de Toluca, el cual es un área plana, con suelos profundos y altitudes promedio de alrededor de 2600 m. Se encontró que las áreas con muy buen potencial son

Cuadro 2. Niveles usados para definir el grado de membresía fuzzy por factor para el cultivo de nopal.

Grado de membresía fuzzy	No membresía 0	Membresía completa 1
Factor		
Temperatura mínima (°C)	< 3.0	> 6.0
Temperatura máxima (°C)	< 12	> 20
Precipitación (mm)	< 750 ó > 950	800 - 900
Profundidad suelo (m)	< 0.1 [†]	> 1.0
pH suelo	< 5.5 ó > 7.5	6-7
Textura suelo	Arcilla, franco arcilloso, franco arcillo limoso, arena, arena francosa y franco limoso [†]	Franco
Altitud (msnm)	> 2800	< 2550
Pendiente (%)	< 2 ó > 14	3-5

[†] De acuerdo con el enfoque de números fuzzy y las variables lingüísticas (Malczewski, 1999) el grado de no membresía fuzzy fue definido como 0.2.

4747 ha, lo cual es promisorio si se toma en consideración que es un cultivo actualmente no explotado en el DDR Toluca. Las áreas con mayor potencial, se ubicaron en parte de los municipios de Atizapán, Capulhuac, San Antonio la Isla, Rayón, Chapultepec y Temoaya y en la parte baja del municipio de Santiago Tianguistenco (Figura 1). Las áreas con potencial muy malo se ubicaron en las partes altas de las montañas del área de estudio, las cuales en general son más frías (temperatura mínima < 3.5 °C y temperatura máxima menor a 12 °C), con altitudes mayores a 2800 m y pendientes mayores a 14%. En el proceso de corroboración de los resultados con los expertos, se encontró que las áreas con potencial muy bueno para nopal fueron localizadas adecuadamente, de acuerdo con los niveles de requerimientos específicos para cada factor. Asimismo, en cuanto al número de hectáreas que se determinaron con ese potencial, representan una superficie importante, aunque este último resultado deberá ser afinado utilizando la información del uso actual de suelo, ya que se sugiere como propuesta de manejo es cultivar en áreas con problemas actuales de degradación física del suelo (erosión).

Al cruzar los mapas de uso/cobertura de suelo y áreas adecuadas se encontró que, en las áreas con uso agrícola actual, 4282 ha se ubicaron en el nivel de potencialidad muy bueno, lo cual es promisorio, si se piensa en un cultivo de alternativa con respecto al uso agrícola actual. Asimismo, 2189 ha de suelos degradados actualmente, se ubicaron dentro de los niveles de potencial muy bueno. Además 4803 ha de áreas con suelos degradados se ubicaron en los niveles de potencial de bueno a medio, lo cual también plantea la posible utilización de estas áreas con ese cultivo y de esta manera tratar de obtener el mejor provecho de las áreas con limitaciones para la producción de cultivos anuales.

CONCLUSIONES

- El proceso de depuración y estimación de datos faltantes permitió obtener una base de información adecuada. A partir de ésta se obtuvieron diferentes productos en forma de mapas necesarios para la evaluación multicriterio (EMC). La integración de los factores biofísicos, (clima, suelo y relieve), permitió la identificación de las áreas adecuadas para cultivos, usando sólo las variables identificadas como relevantes a partir del conocimiento agronómico experto local.

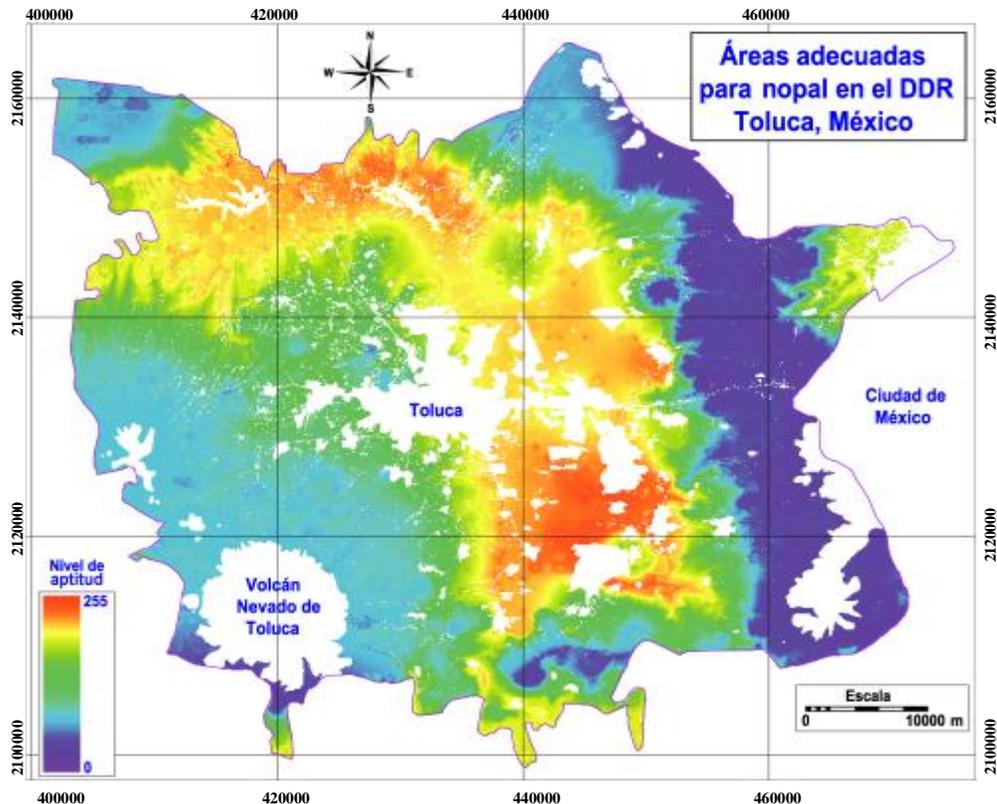


Figura 3. Mapa de áreas adecuadas para nopal en el distrito de desarrollo rural (DDR) Toluca.

- Con el enfoque aplicado se obtuvo información valiosa acerca de la importancia relativa de los criterios de evaluación para el área de estudio, lo cual puede ser útil como antecedente para trabajos posteriores en estos y otros cultivos.

- El análisis de los factores biofísicos permitió construir una plataforma, a partir de la cual, diferentes beneficios fueron obtenidos como: 1) la posibilidad de integrar bases de datos con diferentes resoluciones espaciales y temporales; 2) generar diferentes coberturas temáticas en forma de mapas, con adaptabilidad a las características de los diferentes cultivos como: ciclos de cultivo, fases fenológicas importantes y requerimientos ambientales específicos; 3) los resultados son reproducibles bajo las mismas condiciones; 4) usando los criterios de evaluación adecuados, la información bibliográfica respectiva y una base de datos del medio biofísico adecuadamente preparada, se puede llevar a cabo la evaluación para identificar áreas adecuadas para otros cultivos o especies.

- El proceso de alimentación de la EMC fue fundamental y permitió, por un lado, ajustar los resultados de acuerdo

al conocimiento experto local de los agrónomos, y por otro, validar los resultados obtenidos. En ambos casos este proceso sirvió para mejorar los resultados. Además, se ha mostrado que el problema de identificar áreas adecuadas o potenciales para la producción de cultivos agrícolas de alternativa, se plantea como un problema de evaluación multicriterio que se resuelva a través del análisis espacial que dicha evaluación proporciona.

- Los resultados obtenidos pueden ser usados por los tomadores de decisiones para la planeación del uso del suelo, basándose en los niveles de aptitud potencial para el establecimiento de cultivos de alternativa en el área de estudio. Sin embargo, lo anterior implica un proceso cuidadoso de planeación territorial en el que deben participar los productores locales, debido a que es común que ellos tomen en cuenta factores que no son considerados en un enfoque técnico de planeación.

LITERATURA CITADA

Baca D., J., P. F. Díaz J. y A. Amador. 1992. Regionalización agrícola de las huastecas: agroambientes y zonas agrícolas. *Rev. de Geogr. Agríc.* 17: 7-65.

- Barredo C., J. I. 1996. Sistema de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio. Editorial Ra-Ma. Madrid, España.
- Bosque S., J. 1992. Sistemas de información geográfica. Ediciones Rialp. Madrid, España.
- Carver, S. J., 1991. Integrating multi-criteria evaluation with geographical information systems. *Int. J. Geogr. Inform. Systems* 5: 321-339.
- Ceballos-Silva, A. and J. López-Blanco. 2003a. Delineation of suitable areas for crops using a Multicri-Criteria evaluation approach and land use/cover mapping: a case study in Central Mexico. *Agric. Systems* 77: 117-136.
- Ceballos-Silva, A. and J. López-Blanco. 2003b. Evaluating biophysical variables to identify suitable areas for oat in Central Mexico. *Agric. Ecosyst. Environ.* 95: 371-377.
- Corbett J., D. 1996. Dynamic crop environment classification using interpolated climate surfaces. pp. 117-122. *In: Goodchild, M. F. et al. (eds.). GIS and environmental modeling: progress research issues. GIS World Book. Fort Collins, CO, USA.*
- Díaz-Salgado J. y J. López-Blanco. 2000. Evaluación del potencial para acuicultura costera de camarón en el entorno de la laguna de Mar Muerto, mediante la aplicación de técnicas de análisis multicriterio con un SIG. *Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía UNAM. México* 41: 61-80.
- Eastman, J. R. 1997. IDRISI for Windows User's Guide. Version 2.0. Clark University. Worcester, MA, USA.
- Eastman, J. R. 1999. Multi-criteria evaluation and GIS. pp. 493-502. *In: Longley A. P., M. F. Goodchild, D. J. Maguire, and D. W. Rhind (eds.). Geographical information systems. Principles and technical issues. John Wiley and Sons. New York, NY, USA.*
- Eastman, J. R., W. Jin, P. A. K. Kyem, and J. Toledano. 1995. Raster procedures for multi-criteria/multi-objective decisions. *Photogrammetric Eng. Remote Sensing*. 61: 539-547.
- FAO (Food and Agriculture Organization). 1998. Ecocrop 1 and 2. The crop environmental requirements database and the crop environment response database. FAO land and water digital media, series No. 4. Rome, Italy.
- García N., H., J. López B., R. Moreno S., M. L. Villers R. y R. R. García D. 2000. Delimitación y caracterización de las tierras con uso inadecuado para la agricultura en el Distrito de Desarrollo Rural 004, Celaya, Guanajuato. *Terra* 18: 11-25.
- Granados R., R., T. Reyna T., J. Soria R. y Y. Fernández O. 2004. Aptitud agroclimática en la Mesa Central de Guanajuato, México. *UNAM. Invest. Geográf.* 54: 24-35.
- IIIGEC (Instituto de Información e Investigación Geografía, Estadística y Catastro). 1993. Atlas general del estado de México. Instituto de Información e Investigación Geografía, Estadística y Catastro, Secretaría de Finanzas. Gobierno del estado de México. México, D.F.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 1994. GEMA Geomodelos de altimetría del territorio nacional. Datos de elevación digital a cada 3 segundos de arco de coordenadas geográficas. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México, D.F.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). Varias fechas. Mapas de edafología a escala 1:50 000. Claves. E14A27, E14A38, E14A49, E14A37, E14A58, E14A47, E14A48, E14A28, E14A39. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México, D.F.
- INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias). 1994. Informe anual de actividades. Programa potencial productivo. Campo Experimental Toluca. Toluca, estado de México.
- Jankowski, P. 1995. Integrating geographical information systems and multiple criteria decision-making methods. *Int. J. Geogr. Information Syst.* 9: 251-273.
- Janssen, R. and P. Rietved. 1990. Multicriteria analysis and GIS: an application to agriculture land use in The Netherlands. pp. 129-138 *In: H. Scholten. and J. Stilwell. (eds.). Geographical Information Systems for Urban and Regional Planning. Kluwer, Dordrecht, The Netherlands.*
- Kutter, A., F. O. Nachtergaele, and W. H. Verheye. 1997. The new FAO approach to land use planning and management, and its application in Sierra Leone. *ITC J.* 3/4: 278-283.
- Lai, S. K. and L. D. Hopkins. 1995. Can decision makers express multiattribute preferences using AHP and MUT? An experiment. *Environ. Planning B: Planning and Design* 22: 21-34.
- Lillesand, T. M. and R. W. Kiefer. 1994. Remote sensing and image interpretation. Wiley and Sons. New York, NY, USA.
- Malczewski, J. 1996. A GIS-based approach to multiple criteria group decision-making. *International J. Geogr. Inform. Syst.* 10: 955-971.
- Malczewski, J. 1999. GIS and multicriteria decision analysis. John Wiley and Sons. New York, NY, USA.
- Malczewski, J., R. Moreno-Sánchez, L. A. Bojorquez-Tapia, and E. Ongay-Delhumeau. 1997. Multicriteria group decision-making model for environmental conflict analysis in the Cape Region, Mexico. *J. Environ. Planning Manag.* 40: 349-374.
- Reyna, T. T. y J. Carmona E. 1994. Caracterización pluviométrica y distribución del *Amaranthus* spp en México. *Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía UNAM. México.* 29: 67-90.
- Saaty, T. L. 1980. The analytic hierarchy process. Planning, priority setting, resource allocation. Mc Graw Hill. Pittsburgh, PA, USA.
- SAGAR (Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural). 1998. Uso del suelo en el estado de México. Delegación en el estado de México. Subdelegación de Agricultura. Programa de Fomento Agrícola. México, D.F.
- Sánchez, M. A. 1988. Objetivos económicos de la producción de amaranto, pp. 61-78. *In: Investigaciones recientes sobre amaranto. Coord. Reyna Trujillo T., Instituto de Geografía UNAM. México, D.F.*
- Siddiqui, M. Z., J. W. Everett, and B. E. Vieux. 1996. Landfill siting using geographic information systems: a demonstration. *J. Environ. Engin.* 122: 515-523.