

Potencial agrícola del distrito de desarrollo rural 004, Celaya, Guanajuato, México. Una aplicación del enfoque de límites de transición gradual (fuzzy) utilizando SIG

Hilario García Nieto*
Jorge López Blanco**
Rafael Moreno Sánchez***
María de Lourdes Villers Ruiz**
Rolando R. García Daguer*

Recibido: junio 19, 1998
Aceptado en versión final: agosto 12, 1998

Resumen. Se estudió el Distrito de Desarrollo Rural 004 Celaya, aplicando el enfoque de límites de transición gradual ("fuzzy") como una alternativa para superar las limitaciones derivadas de la aplicación de la metodología convencional ("Booleana"). Se incrementó la resolución con respecto a los trabajos previos de la base de datos físicos y los resultados de la verificación fueron utilizados para ajustar los criterios en la fase de modelación. Las principales ventajas del enfoque fuzzy fueron la ponderación del impacto de los factores de estratificación sobre el rendimiento de los cultivos, presentar mayor desagregación de la aptitud, y no depender de la percepción subjetiva de los especialistas por cultivo para definir los requerimientos de los mismos.

Palabras clave: Aptitud de uso del suelo, enfoque fuzzy, SIG, Distrito de Desarrollo Rural, Guanajuato.

Abstract: The Rural Development District 004 (Celaya, Mexico), was studied using the gradual transition limits (fuzzy) approach as an option to the conventional (Boolean) methods. The resolution of physical factors was increased with relation to the previous studies and the verification results were used in the modelling stage to adjust sustainable criteria. The main advantages of the fuzzy approach were: the determination of the impact of stratification factors on the yield crops and the high separation of the crop suitability. Thus eliminating the subjective perception of researchers to define crops requirements.

Key words: Land use suitability, fuzzy approach, GIS, Rural Development District, Guanajuato.

INTRODUCCIÓN

En 1990, el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) inició la clasificación de las tierras del país de acuerdo con su aptitud para la producción de cultivos (García *et al.*, 1992). Esta primera etapa se realizó únicamente para maíz, frijol, arroz y trigo, bajo condiciones de temporal y para 10 estados seleccionados por su alto nivel de producción. Lo anterior se realizó siguiendo el procedimiento aplicado en el estudio "Provincias agronómicas de las tierras de labor bajo temporal en México" (Turrent, 1986; González *et al.*, 1990). Este estudio se caracterizó por utilizar métodos estadísticos para determinar la relación precipitación/evaporación (P/E) de junio a septiem-

bre, la profundidad del suelo y la altitud como los principales criterios para estratificar las tierras de labor de las entidades federativas en cinco clases cualitativas, desde muy buena productividad, hasta tierras marginales; además, se utilizó el concepto de agrosistemas para definir la tecnología de producción de cultivos específica a nivel de sitio y para cada una de las categorías. La escala de trabajo fue 1:250 000 y 1:50 000 para los estados que contaban con información de suelos a esta escala.

En una segunda etapa, en 1992, se retomaron los estudios de Provincias Agronómicas con el título de "Determinación del potencial productivo de especies vegetales en México" (Ortiz *et al.*, 1992), utilizando un sistema de información geográfica

* SAGAR-INIFAP-Campo Experimental Bajío, Celaya, Guanajuato, México.

** Instituto de Geografía, UNAM, Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510, México, D.F. e-mail: jlblanco@servidor.unam.mx

*** Metropolitan State College of Denver, Denver Co., EUA.

(SIG) como herramienta para realizar las clasificaciones. Se trabajó con las 31 entidades federativas y el Distrito Federal; abarcó no sólo el área agrícola sino que se extendió a la pecuaria y forestal; y, además de los cultivos básicos, se incluyeron otros de temporal y riego, y especies de importancia pecuaria y forestal. La resolución final de la información fue de aproximadamente 900 x 900 m (81 ha).

Con el uso del SIG, a partir de esta etapa mejoró la eficiencia en la captura, manejo y procesamiento de la información para generar mapas de aptitud para la producción de especies vegetales; sin embargo, con base en el análisis de los estudios mencionados, la opinión de los usuarios y la confrontación con resultados de campo se detectaron algunas deficiencias importantes como: *a)* errores, omisiones e información obsoleta en las bases de datos, debido a la antigüedad de la información básica y a la falta de una verificación posterior a la generación de la misma; *b)* la producción de resultados a diferentes niveles de desagregación (estatal, distrital y municipal), sin considerar la resolución y la escala de la información básica; *c)* ignorar el concepto de proyección cartográfica, y *d)* no incluir suficientes rasgos conocidos como referencias de ubicación espacial.

A excepción de los cultivos básicos a los que se les aplicó la metodología de Provincias Agronómicas, la utilidad de dichos estudios fue restringida como consecuencia de la aplicación de modelos ordinales y métodos "Booleanos" muy simples para producir mapas con solamente una clase (potencial alto), y el resto de la superficie sin definir el grado de aptitud. La aplicación de esta metodología propició: *a)* suponer que todos los factores de estratificación tienen la misma importancia en la producción de las especies; *b)* incertidumbre en cuanto a los requerimientos de las especies debido a diferencias en opiniones entre especialistas; *c)* poca utilización de la información existente al reclasificarla de acuerdo con los requerimientos de las especies expresados en intervalos muy amplios, y *d)* una indebida interpretación de los resultados por parte de los usuarios al considerar como inflexibles los límites entre clases.

El método del "álgebra Booleana" es la aplicación de la lógica de verdadero o falso (presencia o ausencia)

para obtener una respuesta. En términos de valores de mapas, son expresados como 1 y 0, también conocidos como "mapas binarios" (Ball, 1993).

Los límites entre clases, definidos con líneas cortantes en las bases de datos de levantamientos de suelos y clasificaciones de tierras (entre otros), ignoran importantes aspectos. Esto es debido al uso de modelos rígidos combinados con los métodos del álgebra "Booleana" disponibles en el SIG. Estos métodos, además de provocar considerables pérdidas de información, no toman en cuenta los supuestos que debe cumplir una clase definida con límites cortantes como son: *a)* la pureza interna de las entidades; *b)* la no variación espacial dentro de las unidades de mapeo, y *c)* la ausencia de error experimental de los atributos medibles de las entidades (Burrough, 1989). La teoría de conjuntos "fuzzy", que es una generalización del álgebra Booleana a situaciones en las cuales los atributos tienen zonas de transición gradual, más bien que límites cortantes, ofrece una útil alternativa a la metodología convencional (Burrough, 1989).

El concepto de "límites de transición gradual" ha sido tomado de la teoría de conjuntos fuzzy desarrollada por Zadeh en 1965, como lo mencionan los trabajos revisados en relación con esta teoría. A partir de Zadeh la teoría y aplicación de conjuntos fuzzy ha sido bien documentada en la literatura (Altman, 1994). Según Sui (1994), esta teoría ha sido aplicada con éxito, principalmente en Asia (Japón es considerado el líder), a los controles de productos como aires acondicionados, elevadores, lavadoras y hornos de microondas. Los primeros estudios revelan el potencial de la lógica fuzzy en todas las fases de la aplicación (captura, representación, recuperación, análisis y despliegue de datos espaciales) del SIG (Sui, 1994).

La teoría de conjuntos convencional admite membresía sólo a un conjunto, a diferencia del concepto fuzzy que es utilizado para determinar el grado en el que un objeto es miembro de un conjunto (Fisher, 1994). Davidson *et al.* (1994) consideran la metodología fuzzy como un refinamiento de la metodología Booleana, la cual tiene sólo dos posibilidades de membresía, completa (valor de 1) o nada (valor de 0). En la metodolo-

gía fuzzy los individuos que caen fuera del intervalo de clases definidas se les asigna un valor de membresía entre 0 y 1, dependiendo del grado de cercanía o lejanía a las clases definidas (*Ibid.*).

La modelación espacial utilizando modelos rígidos y métodos Booleanos provoca la acumulación y propagación de errores que se acentúan al no considerar el peso de los factores de estratificación (Berry, 1993). Por ejemplo, supóngase que los factores relevantes para la producción de un determinado cultivo bajo condiciones de riego son intervalos definidos de temperatura, profundidad de suelo y pendiente del terreno. Al delimitar las áreas aptas para dicho cultivo de acuerdo con cada uno de los factores mencionados, se observa que toda el área en estudio es apta por temperatura, sin embargo, se reduce en un 50% al restringir el área por la pendiente del terreno y en 75% al considerar la profundidad del suelo. Si en la realidad la temperatura es el factor con mayor impacto en el rendimiento del cultivo, mientras que la profundidad y la pendiente del suelo tienen poco impacto en el rendimiento del mismo, se puede estimar superficie que se descarta a pesar de ser casi tan buena como la seleccionada.

Las condiciones básicas en la aplicación de la metodología fuzzy son la determinación de las "funciones de membresía" de las propiedades relevantes de la tierra y la asignación de una ponderación a cada función de membresía para la determinación de la aptitud total (Davison *et al.*, 1994). En la mayor parte de las aplicaciones de este enfoque se han utilizado modelos ordinales en los que los parámetros se determinan con base en la experiencia de los especialistas; sin embargo, se han utilizado modelos empírico-estadísticos para definir dichos parámetros con menor subjetividad (Tang *et al.*, 1991).

En este estudio se considera la posibilidad de superar las limitaciones mencionadas como se plantea a continuación:

a) La determinación de la aptitud de uso del suelo a diferentes niveles de desagregación (estatal, distrital y municipal), debe sustentarse en una base de datos a mayor resolución espacial y temporal que la de los estudios previos.

b) El enfoque de límites de transición gradual entre clases es más adecuado que el enfoque binario convencional, para representar la variabilidad espacial en la determinación de la aptitud de uso del suelo.

El objetivo general de este trabajo es aplicar el enfoque fuzzy para clasificar el potencial agrícola del Distrito de Desarrollo Rural 004 Celaya, Guanajuato, mediante el logro de los siguientes objetivos particulares: a) generar y verificar una base de datos digital del medio físico, de mayor nivel de detalle que la de los estudios previos; b) enriquecer la base de datos con información de vías de comunicación y localidades (con datos censales de población y vivienda) como referencias de ubicación, y c) sugerir el uso potencial del suelo para la producción de los cultivos representativos del área en estudio, mediante el enfoque de límites de transición gradual.

ÁREA EN ESTUDIO

El Distrito de Desarrollo Rural (DDR) 004 Celaya cuenta con una superficie de 387 220.3 ha equivalentes a 12.7% de la superficie estatal (3 058 900 ha) (INEGI, 1993). Se localiza al sureste del estado de Guanajuato, entre los 19° 59' y los 20° 49' de latitud Norte y entre los 100° 19' y los 101° 08' de longitud Oeste. Está integrado por los municipios de Santa Cruz de Juventino Rosas, Comonfort, Celaya, Apaseo el Alto, Apaseo el Grande, Tarimoro, Jerécuaro y Coroneo (**Figura 1**).

La mayor parte de la superficie del DDR 004 forma parte de la provincia fisiográfica Eje Neovolcánico y comprende parte de las subprovincias Bajío Guanajuatense, sierras y bajíos michoacanos, llanos y sierras de Querétaro, y sierras volcánicas y lagos del Centro. Una pequeña parte del noroeste queda comprendida en la provincia Mesa del Centro en la subprovincia Llanuras y Sierras del Norte de Guanajuato. Los principales sistemas de topoformas son llanuras de aluviones profundos, llanos con lomeríos, llanuras con lomeríos y sierras (SPP, 1980).

El DDR 004 cuenta con altitudes que varían entre los 1 600 y 1 800 m en la región de El Bajío, hasta más de 3 000 m en las máximas elevacio-

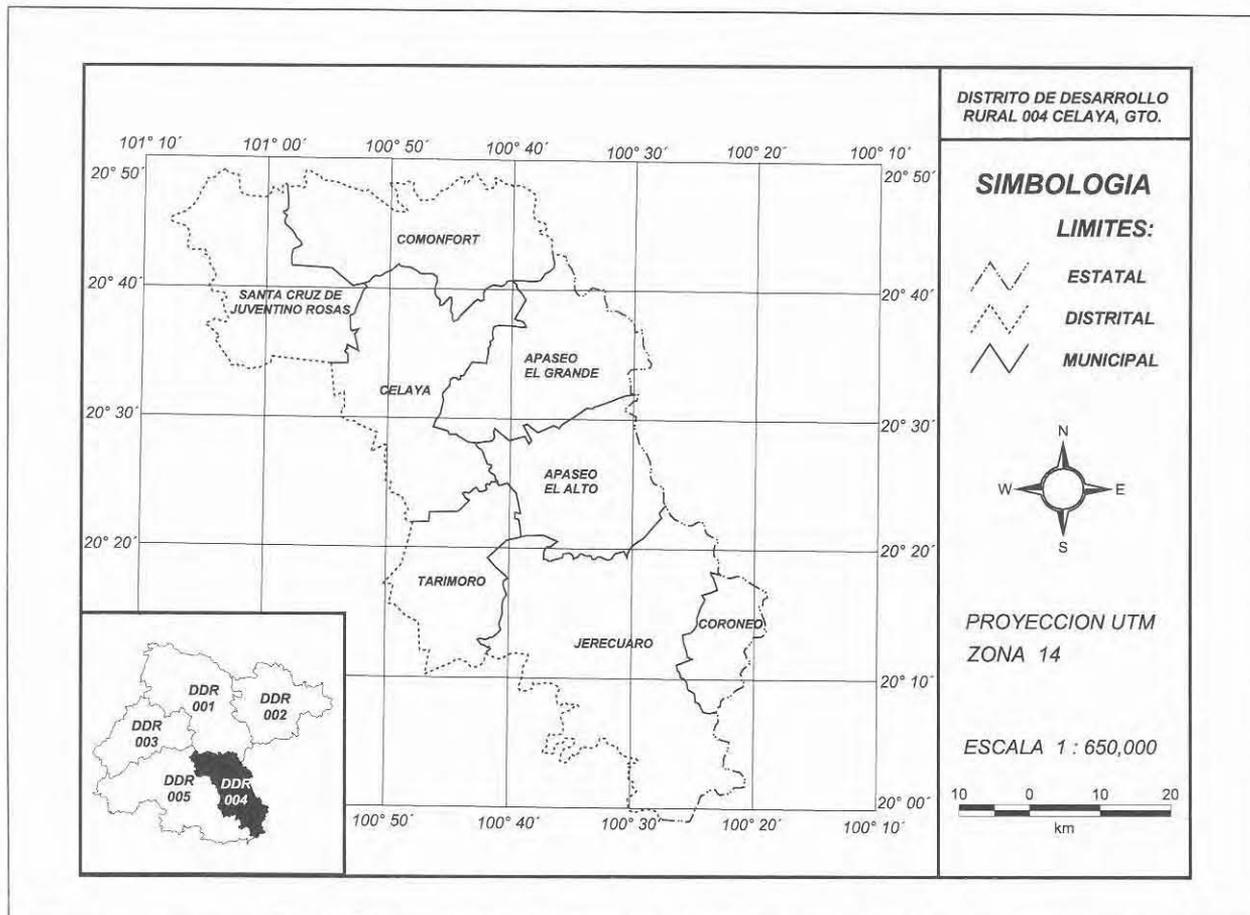


Figura 1. Localización del Distrito de Desarrollo Rural 004 Celaya, Guanajuato.

nes. En el área del Bajío se presentan pendientes menores a 4%, mientras que en el resto del distrito sólo en pequeñas áreas aisladas se presentan pendientes de ese orden. Las unidades de suelo dominantes son los Vertisoles, Feozems y en menor proporción los Leptosoles en las elevaciones más pronunciadas. A excepción de El Bajío, son muy escasas las áreas sin fases físicas (suelos con profundidad mayor de 1.0 m). Los Vertisoles presentan fases químicas en aproximadamente 10 000 ha clasificadas como "salino-sódicos", "sódicos" y "moderadamente salino-sódicos" (CETENAL, 1973). Los Vertisoles y los Feozems no presentan restricciones para la producción de varios cultivos, mientras que los Leptosoles se consideran no aptos para la agricultura (FAO, 1978 y 1981).

Desde el punto de vista de productividad agrícola, "El Bajío Guanajuatense" se define como el área con altitudes entre 1 600 a 1 800 msnm, suelos profundos con unidades de suelo dominantes Vertisoles y Feozems, y con pendientes menores de 4%. El Bajío Guanajuatense comprende en este Distrito 50 396 ha (15.7%), repartido principalmente entre los municipios de Celaya, Apaseo el Grande, Tarimoro y Santa Cruz de Juventino Rosas. En general, El Bajío es considerado un área de alta productividad para la agricultura de riego.

La precipitación presenta un gradiente positivo de noroeste a sureste. Las cantidades anuales acumuladas en el noroeste varían de menos de 600 mm hasta más de 800 en el extremo sureste. La temperatura media anual en la región de El Bajío alcanza va-

lores superiores a los 19° C, en el centro predominan las temperaturas entre 17 y 18° C, y las partes más frescas (menores de 15° C) se ubican principalmente al sureste del distrito en las máximas elevaciones.

GENERACIÓN DE LAS BASES DE DATOS

Las bases de datos se pueden dividir en: suelo, topografía, clima, referencias de ubicación, información sobre los requerimientos de los cultivos y estadísticas de productividad de cultivos.

Base de datos de suelo

De las 51 cartas edafológicas escala 1:50 000 que cubren el estado de Guanajuato, 13 se digitizaron para cubrir la totalidad del área en estudio (CETENAL, 1973). La digitización y despliegue de cartas se realizó en el módulo ARCEDIT del ARC/INFO, el resto de los procesos se realizó en el módulo STARTER KIT. A las cartas digitizadas se les creó topología, se empataron los polígonos abiertos de coberturas vecinas, se georreferenciaron con la proyección Universal Transversa de Mercator (UTM), y se unieron para generar una sola cobertura. La cobertura total fue recortada con los límites del área en estudio. Se eliminaron los polígonos con una superficie menor de 2.5 ha, resultando finalmente 720 polígonos.

A cada uno de los polígonos se les asignó una etiqueta. Los atributos de cada uno de los polígonos de suelos fueron: unidades de suelo dominantes, secundarias y terciarias; tres categorías de textura de suelo; fases físicas y químicas; y tres categorías de pendiente. Para las unidades de suelo, texturas y pendientes, se les asignó la misma simbología de la cartografía; a las fases físicas y químicas se les asignó un número progresivo correspondiente al orden en que aparecen en la simbología. Las coberturas convertidas a formato raster ("rasterizadas") o mapas fueron importados a IDRISI.

Se realizó una verificación de las principales características de la base de datos de suelos con el propósito de tener evidencias que permitieran detectar las variables que deben ser descartadas, ajustadas, actualizadas o tomadas con reserva por haber

cambiado a través del tiempo. Para verificar las unidades de suelo dominantes se cotejaron las propiedades de acuerdo con la FAO/Unesco para definir las unidades y subunidades de suelo (FAO, 1978 y 1981), con análisis de muestreos de campo y análisis de muestras del área en estudio existentes en el laboratorio del Campo Experimental Bajío (CEBAJ). Por otra parte, se realizó un muestreo dirigido a las áreas con fases químicas, para determinar el grado de salinidad y sodicidad de las áreas cartografiadas con estas fases. La intensidad del muestreo se realizó considerando la heterogeneidad y extensión del área en cuestión. Para el caso de la fase física pedregosa se eligió un polígono con esta característica de acuerdo con la cartografía, y se verificó mediante observaciones directamente en las parcelas, e información de las autoridades ejidales y de los propios usuarios.

Base de datos topográfica

El Modelo de Elevación Digital (MED), utilizado en México en diferentes estudios, ha sido producido por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). El MED se originó en Estados Unidos, a partir de cartas topográficas escala 1:250 000 y, mediante interpolaciones, se generó un dato de elevación aproximadamente a cada 90 x 90 m. A partir del MED se generó su respectivo mapa de pendientes del terreno para el estado de Guanajuato. Este mapa de pendientes se recortó de la misma manera que el MED con los límites del DDR 004.

Se verificó el MED para el área en estudio y el mapa de pendientes generado a partir de éste, con el propósito de definir su nivel de confiabilidad, ésta se definió mediante un análisis de regresión lineal simple entre los datos del MED obtenidos a través de un muestreo sistemático directamente de la computadora y los obtenidos en la localidad correspondiente a las cartas topográficas escala 1:50 000 (CETENAL, 1972). También se realizó otro análisis utilizando datos de bancos de nivel. Las pendientes se verificaron mediante un análisis de regresión entre los datos de pendiente del MED y los obtenidos de las cartas topográficas escala 1:50 000 (*Ibid.*).

Base de datos de clima

La información climática diaria del estado de Guanajuato procede de la gerencia estatal de la Comisión Nacional del Agua (CNA) contenida en el paquete CLICOM 3.0 (WCDP, 1992), sin embargo, para realizar las interpolaciones climáticas fue necesario integrar una parte de los datos de las estaciones de los estados vecinos. Se seleccionó la información de las estaciones ubicadas dentro del estado y la información de las estaciones de los estados vecinos ubicadas aproximadamente a 30 minutos del límite estatal.

Con apoyo del Programa de Matemáticas Aplicadas del Campo Experimental Bajío (CEBAJ) la información climática de 331 estaciones del estado de Guanajuato (164) y estados vecinos (136) fue revisada y depurada. Se corrigieron u omitieron los datos erróneos y se eliminaron las estaciones con menos de 15 años de observaciones, se calcularon los promedios decenales y se procesaron los modelos para obtener mapas decenales de las temperaturas máxima y mínima, y de precipitación y evaporación acumuladas decenalmente (36 mapas de cada variable).

Los modelos de interpolación de los estudios previos (en Qbasic) se adecuaron en lenguaje C considerando básicamente las siguientes modificaciones: a) inclusión de un mayor número de estaciones (de 4 a 16 estaciones) en el cálculo de los valores para cada celda (área con el mínimo nivel de detalle, en este caso de 100 x 100 m); b) seleccionar, de los cuatro puntos cardinales, las estaciones que intervinieron en el cálculo de los valores para cada celda, y c) generar mapas de variables climáticas de períodos decenales. En los modelos de temperatura interviene el MED en código ASCII, debido a que es necesario realizar un ajuste por altitud. El ajuste por altitud (gradiente altotérmico) fue estimado a nivel local con base en un análisis de regresión entre altitud y temperatura para cada decena.

Una vez que se procesaron los modelos, se generaron 144 mapas (36 decenas del año por cuatro variables), posteriormente se recortaron los mapas

con los límites del área en estudio para ser utilizados en la siguiente fase del proyecto. A partir de los mapas básicos (temperaturas máxima y mínima, precipitación y evaporación) se generaron otros índices climáticos, como la temperatura media decenal y anual, el índice precipitación / evaporación y la precipitación anual acumulada.

Estadísticas de productividad de cultivos

Se generó una base de datos que contiene los datos históricos de productividad de cultivos de 17 años (1978 a 1994). La fuente original de esta información denominada «evaluación de cosechas» es la Jefatura de Planeación de la Delegación de la SAGAR en el estado de Guanajuato. La mayor parte de la información fue proporcionada por el programa de Economía Agrícola del CEBAJ y se actualizó en algunos casos solicitando directamente la información en la sede del Distrito. La información concentrada en reportes anuales consta de superficie sembrada, superficie cosechada y rendimiento en t/ha, por cultivo, para cada uno de los municipios del Distrito. Los cultivos están divididos en Primavera-Verano (P-V), Otoño-Invierno (O-I) y Perennes, de acuerdo con su ciclo y con la condición de humedad, en riego, humedad residual y temporal.

En cuanto a la confiabilidad de la información mencionada, cabe aclarar que la superficie sembrada y cosechada para los cultivos básicos puede considerarse más aproximada a la realidad que las superficies registradas para las hortalizas, las cuales parecen estar subestimadas (com. per. de Boris Marañón, Facultad de Economía de la UNAM, 1998). En cuanto al rendimiento de los cultivos, se ha aclarado por parte del Centro de Estadística Agropecuaria de la SAGAR (com. per. del Act. Juan Manuel Galarza y Mercado, 1997) que en algunos casos los datos de rendimiento no proceden de un muestreo, sino que son una estimación subjetiva de los responsables de los DDR.

A partir de esta información se definieron los cultivos representativos del área en estudio. También fue utilizada para realizar un análisis de regresión entre los factores incontrolables de la producción

de cultivos y el rendimiento de los mismos, como una alternativa para definir los factores relevantes y el peso que se les debe dar de acuerdo con su impacto en la producción de cada cultivo en la clasificación con enfoque fuzzy.

CLASIFICACIÓN FUZZY

A partir de la superficie sembrada de las estadísticas de productividad, se definieron los cultivos tanto de temporal (T) como de riego (R) representativos del área en estudio. Se seleccionaron los que en conjunto se siembran en más de 90% de la superficie agrícola, en orden descendente de importancia son: Maíz T, Maíz-frijol T, Alfalfa R, Maíz R, Sorgo R, Sorgo T, Trigo R, Cebolla T, Garbanzo T y Frijol T. Se trabajó con los cultivos mencionados a excepción de la cebolla de temporal que no cuenta con suficiente información de productividad. Para el resto de los cultivos se aplicó el enfoque fuzzy siguiendo, en general, los pasos definidos en algunas aplicaciones reportados en la literatura (Tang

et al., 1991; Tang y Van Ranst, 1992; Tang y Ruan, 1992; y Van Ranst *et al.*, 1996).

La aplicación de este enfoque se puede resumir en los cinco pasos que se enlistan a continuación y que se representan esquemáticamente en la **figura 2**.

1. Se definieron los factores de estratificación mediante un análisis de regresión lineal múltiple.
2. Se determinaron las funciones de membresía mediante un análisis de regresión lineal simple.
3. Se asignó una ponderación a cada función con base en el coeficiente de determinación (R^2) de las ecuaciones de regresión lineal simple, mencionadas en el punto anterior.
4. Las funciones de membresía transformadas en mapas se normalizaron a valores entre 0 y 1.0, dividiendo cada mapa entre su valor máximo.
5. Se determinó una aptitud total sumando todos los mapas ponderados que intervienen en la determinación de las áreas de aptitud de la especie en cuestión.

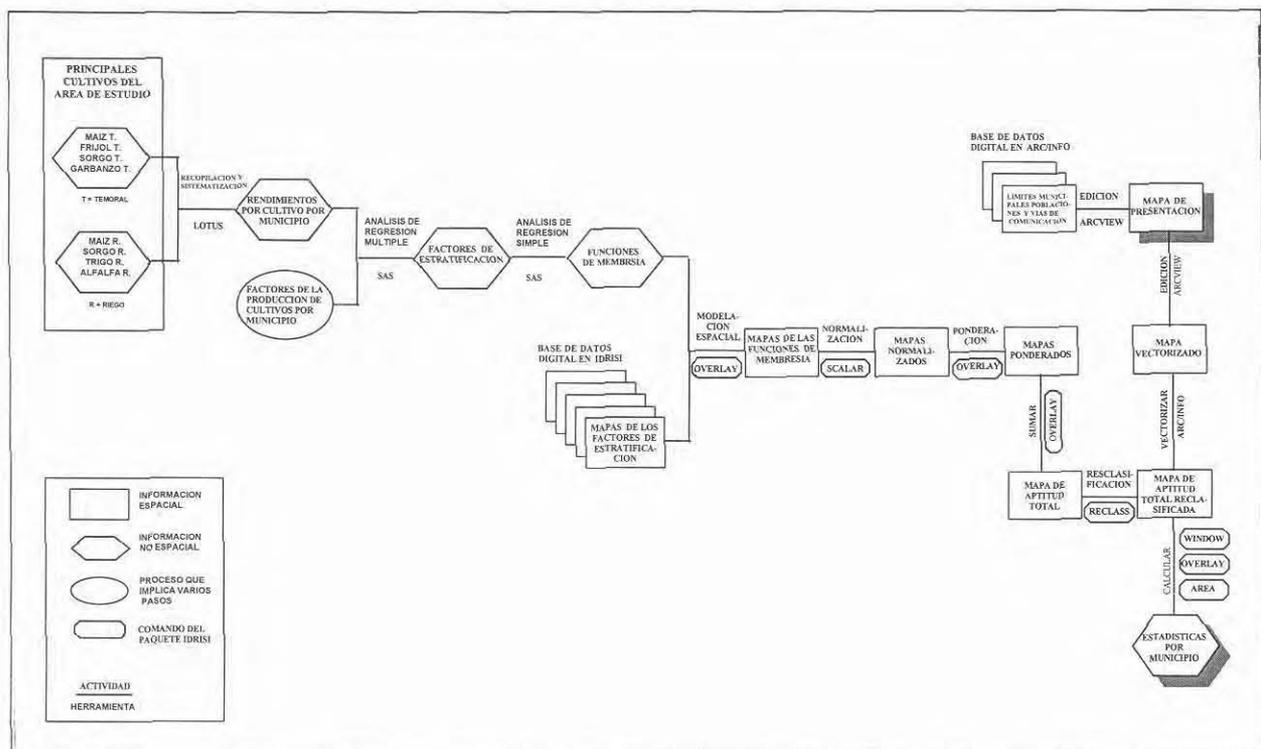


Figura 2. Diagrama general de la aplicación de la metodología de límites de transición gradual (fuzzy).

Procesamiento de la información

Idealmente, la definición de los factores de estratificación, la determinación de las funciones de membresía y la ponderación de acuerdo con el efecto de las mismas en el rendimiento de los cultivos, debería ser el resultado de un planteamiento con estos objetivos. Lo anterior podría lograrse explorando la variación climática y edáfica (factores incontrolables de la producción de cultivos) del área en estudio, mediante experimentos de productividad de cultivos donde el manejo (factores controlables de la producción de cultivos) fuera una constante en niveles óptimos. Sin embargo, esto tendría un alto costo y requeriría de mucho tiempo; por ello, en este trabajo se utilizó la información disponible de productividad de cultivos a pesar de su generalidad y las limitaciones mencionadas en cuanto a su confiabilidad.

Los datos requeridos para definir los factores de estratificación fueron los rendimientos, ponderados por municipio, como variables dependientes, y los factores incontrolables de la producción de cultivos, ponderados por municipio, como variables independientes. Los datos de rendimiento fueron obtenidos de la base de datos de productividad de cultivos y los factores incontrolables de las bases de datos de suelos, topografía y clima.

El procedimiento de ponderación de los datos de rendimiento consistió en multiplicar la superficie cosechada de cada cultivo, en hectáreas, por el rendimiento de los mismos en kg/ha para cada año en particular, la suma de tales productos se dividió entre la superficie cosechada total durante el período considerado (17 años en el mejor de los casos).

Para ser congruentes con el grado de generalización de los rendimientos por cultivo, los principales factores incontrolables de la producción de cultivos se ponderaron por superficie para cada municipio. En este proceso se clasificaron de acuerdo con el tipo de variable (continua o discreta), al ciclo de los cultivos (Primavera-Verano, Otoño-Invierno y Perennes), a la condición de humedad (riego o temporal) y al área agrícola de cada municipio, descartando las zonas con más de 4% para cultivos de riego y con más de 8% para cultivos de temporal.

Las variables continuas consideradas fueron: temperatura media, precipitación, evaporación, índice de precipitación sobre evaporación, asnm y pendientes. Estas variables (mapas) se reclasificaron en IDRISI (5 a 10 intervalos) procurando cubrir la variación total del estado de Guanajuato. La ponderación para el área agrícola de cada municipio se realizó multiplicando la superficie de cada clase por el valor medio de la misma (marca de clase) y dividiendo la suma de tales productos entre la superficie total de las clases. El índice P/E ha sido utilizado en la metodología de Provincias Agronómicas como un balance de humedad, altamente correlacionado con el rendimiento de los cultivos de temporal a nivel nacional (Turrent *et al.*, 1986; González *et al.*, 1990).

Las variables discretas consideradas fueron: profundidad de suelo, porcentaje de Bajío y un índice de aptitud edáfica. Para determinar la profundidad del suelo en centímetros, primeramente se determinaron las cuatro clases posibles de profundidad de suelo a partir de las fases físicas: < 5 cm (Leptosoles), de 0 a 50 cm (lítica somera, dúrica somera y petrocálica), 50 a 100 cm (lítica y dúrica profunda), y mayor de 100 cm (sin fases físicas). De acuerdo con las verificaciones de campo, se consideró que las fases físicas, pedregosa y gravosa, no afectan la profundidad de suelo. A las tres primeras clases se les asignó el valor medio de la clases (2.5, 25 y 75 cm, respectivamente), a los suelos sin fases físicas se les asignó un valor de 100 cm por considerar que, a partir de esta profundidad, no existen restricciones para el desarrollo de las raíces de los cultivos en cuestión.

Como paso previo al análisis de regresión múltiple para determinar los factores relevantes se realizó un análisis de correlación para tener una idea general del efecto de las variables consideradas en el rendimiento de los cultivos, así como la relación entre variables independientes.

Los factores de la producción de cultivos más relevantes se determinaron mediante análisis de regresión lineal múltiple entre el rendimiento de los cultivos (variable dependiente) y los factores incontrolables de la producción de cultivos por municipio ponderados por superficie (variables independien-

tes). Los análisis de regresión se realizaron en el "Statistical Analysis System" (SAS).

De acuerdo con el análisis de regresión lineal múltiple, las variables que contribuyeron a mejorar significativamente un modelo de regresión múltiple fueron seleccionadas para generar las funciones de membresía. Las variables seleccionadas se correlacionaron directamente con el rendimiento de los cultivos (análisis de regresión lineal simple) generando, de esta manera, las funciones de membresía. Las funciones de membresía se aplicaron a los mapas correspondientes que presentan la variación espacial, para esto, se multiplicó el mapa por la pendiente de la función (β_1) y se le sumó o restó la constante (β_0) dependiendo del signo. De esta manera se obtuvo un mapa con valores continuos de rendimientos para cada función de membresía. Posteriormente cada mapa se dividió entre su rendimiento máximo (máximo valor de membresía), para obtener mapas con valor máximo de 1.0 (proceso de normalización).

La ponderación de las funciones de membresía se realizó en forma proporcional a los coeficientes de determinación (R^2) de las funciones de membresía. La proporción se expresó en la escala de 0 a 1.0, dividiendo cada uno de los coeficientes de determinación entre la suma total de los mismos. De esta manera se determinó un valor de ponderación para cada función de membresía. Cada uno de los mapas de las funciones de membresía, descritas en el párrafo anterior, se multiplicaron por el factor de ponderación, generando un mapa con valores en-

tre 0 y 1.0, de acuerdo con el peso de dicho factor sobre el rendimiento del cultivo en cuestión.

Se determinó la aptitud total mediante la suma de los mapas ponderados, de tal manera que el producto final fue un mapa con valores continuos de aptitud entre 0 y 1.0. Posteriormente, para facilitar la interpretación de los resultados, el mapa final se reclasificó en 10 clases con intervalos de 0.1, a este mapa se agregaron las principales áreas urbanas; finalmente, se calculó la superficie correspondiente a cada clase de productividad por municipio.

Después de analizar los mapas fuzzy se observó que los cultivos de riego y temporal son alternativos, ya que ocupan cuando menos parte de la misma área, por ello, se determinó, con el mismo enfoque fuzzy, una aptitud general para agricultura de riego y temporal. El procedimiento consistió en sobreponer las aptitudes parciales de cada cultivo, luego se normalizaron dividiendo entre el valor máximo, y con fines de presentación se reclasificaron en intervalos de 0.1.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En el **cuadro 1** se presenta una comparación de las principales características de las bases de datos para la realización de este estudio, en relación con las bases de datos de los estudios previos. Se puede observar que la base de datos generada en el trabajo es más confiable y permite un mayor nivel de detalle, lo que posibilita la detección de clases y presentación de resultados a nivel municipal.

Cuadro 1. Comparación de las características de los estudios previos y los de este estudio

Característica	Estudios Previos	Presente Estudio
Escala de información de suelos	1:500 000	1:50 000
Resolución topográfica	900 x 900 m = 81 ha	100 x 100 m = 1 ha
Estaciones climáticas	149	331
Períodos climáticos	Mensuales	Decenales
Proyección geográfica	No	Sí
Desagregación de resultados	Estatal y Distrital	Estatal, Distrital y Municipal
Escala en mapas de presentación	No	Sí
Vías de comunicación como referencia	No	Sí
Poblaciones como referencia	No	Sí
Estadísticas de productividad	No	Sí

En el **cuadro 2** se presentan los mejores modelos de regresión múltiple logrados para explicar la variación del rendimiento de los cultivos de temporal y riego representativos del área en estudio. En todos los casos, la significancia (prob.> F) de las ecuaciones es muy alta debido a los altos valores de F y al número de observaciones (n) relativamente grande. A excepción del garbanzo de temporal, trigo y alfalfa de riego, los coeficientes de determinación (R^2), para el resto de los cultivos explican, más de 50% de la variación del rendimiento de los cultivos. Podría pensarse que las R^2 son relativamente bajas, sin embargo, debe tenerse en cuenta que: a) las variables independientes corresponden úni-

camente a factores incontrolables de la producción de cultivos y que no se están considerando los factores controlables de la producción (manejo) que seguramente contribuyen a explicar otra parte de la variación de los rendimientos; b) el objetivo de estos modelos no es predecir rendimientos, sino sólo un apoyo para seleccionar los factores de estratificación, determinar las funciones de membresía, y asignar una ponderación a las funciones de membresía, y c) la información no procede de un experimento diseñado con este objetivo, sino de un análisis de la información disponible que permite aplicar el enfoque fuzzy y tener una aproximación del potencial agrícola para el área en estudio.

Cuadro 2. Modelos de regresión múltiple entre el rendimiento de los cultivos y variables del medio físico.

VARIABLE DEPENDIENTE	VARIABLES INDEPENDIENTES	β_0	β_1	β_2	β_3	R^2	n	F	prob.> F
REND. MAÍZ T.	PJS, EAO, PROS1	-3807.1	5.8166	1.1659	4.2974	0.73	46	38.4	0.0001
REND. FRIJOL T.	P/EJS, PROS2	-263.5	665.350	2.1076		0.54	41	22.4	0.0001
REND. SORGO T.	PRA, ALT2	3420.5	4.5600	-2.2497		0.57	35	20.9	0.0001
REND. GARBANZO T.	PEND2, PROS1	586.4	-113.6191	4.6306		0.41	33	10.4	0.0004
REND. MAÍZ R.	PROS1, EAO, ALT2	-4864.7	29.8163	3.1513	1.3904	0.58	45	18.7	0.0001
REND. SORGO R.	ALT1, PROS1	9776.7	-2.8048	20.8520		0.54	39	21.2	0.0001
REND. TRIGO R.	ALT1, PROS1	68924.6	-1.6850	14.5060		0.49	42	18.6	0.0001
REND. ALFALFA R.	ALT2	174770.0	-59.9950			0.48	37	32.3	0.0001

PJS = PRECIPITACIÓN DE JUNIO A SEPTIEMBRE

EAO = EVAPORACIÓN DE ABRIL A OCTUBRE

PROS1 = PROFUNDIDAD DE SUELO EN EL ÁREA 1

P/EJS = ÍNDICE PRECIPITACIÓN/EVAPORACIÓN DE JUNIO A SEPTIEMBRE

PROS2 = PROFUNDIDAD DE SUELO EN EL ÁREA 2

PRA = PRECIPITACIÓN ACUMULADA ANUAL

ALT2 = ALTURA SOBRE EL NIVEL DEL MAR EN EL ÁREA 2

PEND2 = PENDIENTE EN EL ÁREA 2

PROS1 = PROFUNDIDAD DE SUELO EN EL ÁREA 1

β_0 = CONSTANTE

$\beta_1, \beta_2, \beta_3$ = PENDIENTE DE LAS VARIABLES

R^2 = COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN

n = NUMERO DE OBSERVACIONES

La profundidad del suelo aparece como la variable más frecuente en las ecuaciones tanto para cultivos de riego como de temporal; sin embargo, a excepción del garbanzo, la precipitación (anual o de junio a septiembre) aparece en los cultivos de temporal como la variable más importante, mientras que para los cultivos de riego, a excepción del maíz, la altitud se presenta como la variable más relevante. Si se considera la alta relación entre la temperatura y la altura sobre el nivel del mar, puede pensarse que realmente sea la

temperatura la variable que explica la distribución de las zonas potenciales para la producción de cultivos, sin embargo, es posible que en este trabajo la altitud derivada del Modelo de Elevación Digital haya sido mejor estimada que la temperatura, razón por la cual esta variable contribuye a explicar en mayor grado la variación del rendimiento de los cultivos.

El garbanzo, más que un cultivo de temporal, es un cultivo de humedad residual, ya que durante su ci-

clo (octubre a febrero) las precipitaciones son mínimas y la variación total en el estado es de apenas 30 mm. Lógicamente, en el análisis de regresión, la variable precipitación no resultó relevante y se incluyeron otras variables como la profundidad del suelo (positiva) y la pendiente (afectando negativamente) relacionadas con la conservación y pérdida de la humedad en el suelo, respectivamente.

A pesar de los altos coeficientes de determinación, la pendiente contribuyó a mejorar significativamente la ecuación de regresión múltiple para garbanzo de temporal. Cabe aclarar que este cultivo se siembra bajo labranza reducida en áreas con pendientes pronunciadas.

En el caso de la alfalfa de riego, ninguna variable contribuyó a mejorar significativamente la ecuación de regresión lineal simple con la altitud.

En el **cuadro 3** se presentan las funciones de membresía para los cultivos de riego y temporal. Estas ecuaciones son resultado de un análisis de regresión simple de cada una de las variables componentes de la ecuación de regresión múltiple. Como un criterio de conservación de suelos se incluye, además, la ecuación del rendimiento con la pendiente, a excepción de frijol de temporal, debido a su baja significancia (menor de 0.15).

Las funciones de membresía para cada cultivo presentadas en el **cuadro 3** se convirtieron en mapas, se normalizaron, se ponderaron, se obtuvo un mapa de aptitud total y se reclasificó en 10 clases posibles. Todo este proceso se realizó mediante un archivo de comandos ejecutado en IDRISI. Se calcularon estadísticas y finalmente se editó el mapa final. En la **figura 3** se presenta como ejemplo el mapa para maíz de temporal.

Si se tiene en cuenta que la resolución de los mapas es de 100 x 100 m, equivalente a 1.0 ha, el resultado de las estadísticas puede ser expresado en hectáreas o en número de celdas (píxeles o localidades). Se observó que no todos los cultivos (tanto de riego como de temporal) presentan celdas con la máxima categoría (0.9-1.0) en todos los municipios. Esto se debe a que el ámbito de los

modelos de regresión es estatal, lo cual significa que en el estado de Guanajuato algunos municipios pueden estar mejor clasificados. También se observa que, en general, existe mayor aptitud para cultivos de riego que de temporal, esto es muy obvio, ya que bajo condiciones de riego se satisface la condición de humedad en el suelo, que es la principal limitante para los cultivos de temporal en el área en estudio.

El mayor potencial para los cultivos de temporal se presenta en el municipio de Jerécuaro, con superficies de los cuatro cultivos de temporal en estudio con la máxima categoría. Este municipio se caracteriza por presentar áreas con las precipitaciones más altas. A excepción de Coroneo, todos los municipios presentan superficies considerables para garbanzo de temporal en la máxima categoría. El maíz y la alfalfa de riego presentan superficies considerables con la máxima categoría en todos los municipios, a excepción de Jerécuaro y Coroneo. La principal diferencia de las áreas agrícolas de éstos, con el resto de los municipios, es la mayor altitud asociada a temperaturas más bajas y no contar con área de El Bajío. De particular importancia resulta el gran potencial del municipio de Celaya para estos cultivos.

En la **figura 4** se presenta la distribución espacial del potencial fuzzy para la agricultura de temporal. Al analizar las estadísticas se observó un total de 7 444 ha clasificadas con la máxima categoría (aptas para todos los cultivos de temporal en cuestión).

La **figura 5** corresponde a la distribución espacial de potencial fuzzy para la agricultura de riego. Sin considerar la disponibilidad de agua de riego, el potencial para agricultura de riego es mucho mayor que para la agricultura de temporal, ya que se presentan 85 500 ha clasificadas en la máxima categoría (aptas para todos los cultivos de riego en cuestión). Sobresalen por su gran superficie potencial los municipios de Celaya, Apaseo el Grande y Santa Cruz de Juventino Rosas.

En general, la metodología fuzzy presenta las siguientes ventajas sobre la metodología convencional: a) considerar que no todos los factores tienen

Cuadro 3. Determinación de las funciones de membresía para los cultivos representativos del área en estudio

Cultivo y ciclo	Variable dependiente	Variable independiente	Constante (β_0)	Pendiente (β_1)	R ²	n	F	PROB.> F
MAÍZ P-V T.	REND. (kg/ha)	PJS	-2607.5	6.8713	0.63	46	74.5	0.0001
		EAO	-1261.1	1.8452	0.13	46	6.7	0.025
		PROS1	-201.2	16.1000	0.44	46	34.2	0.0001
		PEND1	1784.3	-475.9300	0.26	46	15.4	0.001
FRIJOL P-V T.	REND. (kg/ha)	P/E	-196.8	763.7400	0.49	41	37.1	0.0001
		PROS2	110.32	4.0666	0.24	41	12.2	0.001
SORGO P-V T.	REND. (kg/ha)	PRA	-1994.5	6.4386	0.41	35	22.9	0.0001
		ALT2	8248.9	-3.2382	0.40	35	21.9	0.0001
		PEND1	3090.5	-587.8600	0.11	35	4.2	0.05
GARBANZO O-I T.	REND. (kg/ha)	PEND2	1080.0	-156.2195	0.36	33	17.4	0.001
		PROS1	-58.8	8.9550	0.29	33	12.4	0.001
MAÍZ P-V R.	REND. (kg/ha)	PROS1	1651.8	29.7390	0.48	45	39.4	0.0001
		EAO	-1665.0	4.5086	0.24	45	13.6	0.001
		ALT2	6141.7	-1.1916	0.10	45	2.7	0.15
		PEND1	5615.8	-1067.7	0.39	45	27.9	0.0001
SORGO P-V R.	REND. (kg/ha)	ALT1	14661.0	-4.5392	0.49	39	35.8	0.0001
		PROS1	2964.4	40.9950	0.46	39	32.1	0.0001
		PEND1	7776.1	-1016.4	0.20	39	9.0	0.01
TRIGO O-I	REND. (kg/ha)	ALT1	9937.7	-2.7445	0.43	42	30.4	0.0001
		PROS1	2713.8	26.7760	0.41	42	28.1	0.0001
		PEND1	5885.8	-701.2700	0.18	42	8.9	0.01
ALFALFA PER.	REND. (kg/ha)	ALT2	174770.0	-59.9950	0.48	37	32.3	0.0001
		PEND1	79527.0	-11147.0	0.13	37	5.4	0.05

PJS = PRECIPITACIÓN DE JUNIO A SEPTIEMBRE

EAO = EVAPORACIÓN DE ABRIL A OCTUBRE

PROS1 = PROFUNDIDAD DE SUELO EN EL ÁREA 1

PEND1 = PENDIENTE EN EL ÁREA 1.

P/EJS = ÍNDICE PRECIPITACIÓN/EVAPORACIÓN DE JUNIO A SEPTIEMBRE

PRA = PRECIPITACIÓN ACUMULADA ANUAL

ALT2 = ALTURA SOBRE EL NIVEL DEL MAR EN EL ÁREA 2

PEND2 = PENDIENTE EN EL ÁREA 2

ALT1 = ALTURA SOBRE EL NIVEL DEL MAR EN EL ÁREA 1

β_0 = CONSTANTE

$\beta_1, \beta_2, \beta_3$ = PENDIENTE PARA CADA VARIABLE

R² = COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN

n = NÚMERO DE OBSERVACIONES

el mismo impacto en la productividad de los cultivos; b) presentar mayor desagregación de la aptitud, y c) no depender de la percepción subjetiva de los especialistas, por especie, para definir los requerimientos.

Una de las principales limitaciones del enfoque fuzzy es la determinación subjetiva de la relevancia de las propiedades particulares de la tierra sobre el

rendimiento de cada cultivo, por falta de datos. Si se considera que en el INIFAP se han realizado algunos esfuerzos en ese sentido, principalmente con modelos empírico-estadísticos, se presenta una línea de investigación sobre la integración de modelos de productividad de cultivos con SIG, aplicando métodos de clasificación fuzzy. La selección de los factores de estratificación, la definición de las funciones de membresía y su ponderación, pueden ser

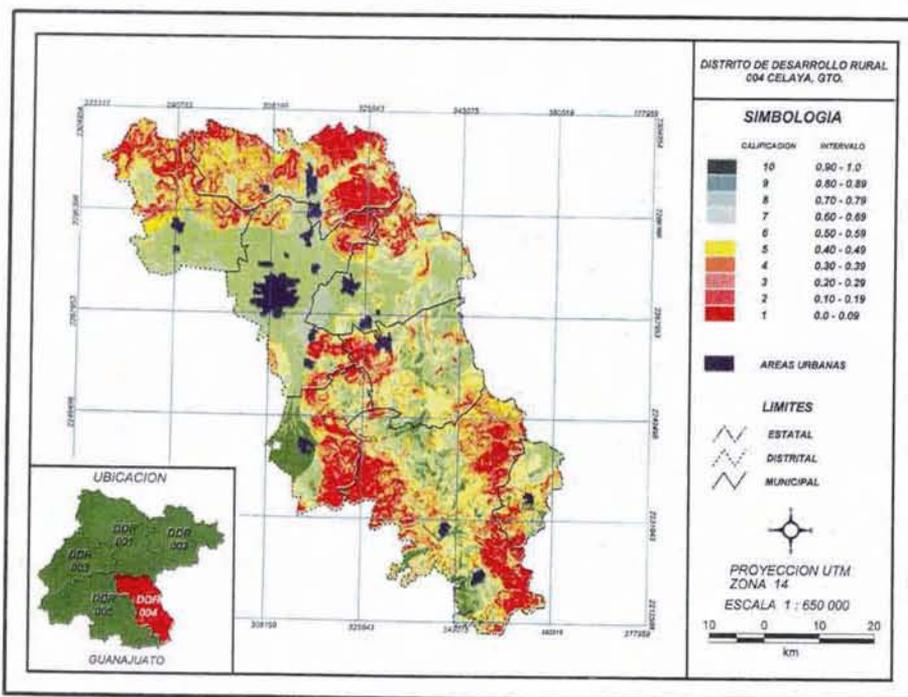


Figura 3. Clasificación fuzzy para maíz de temporal.

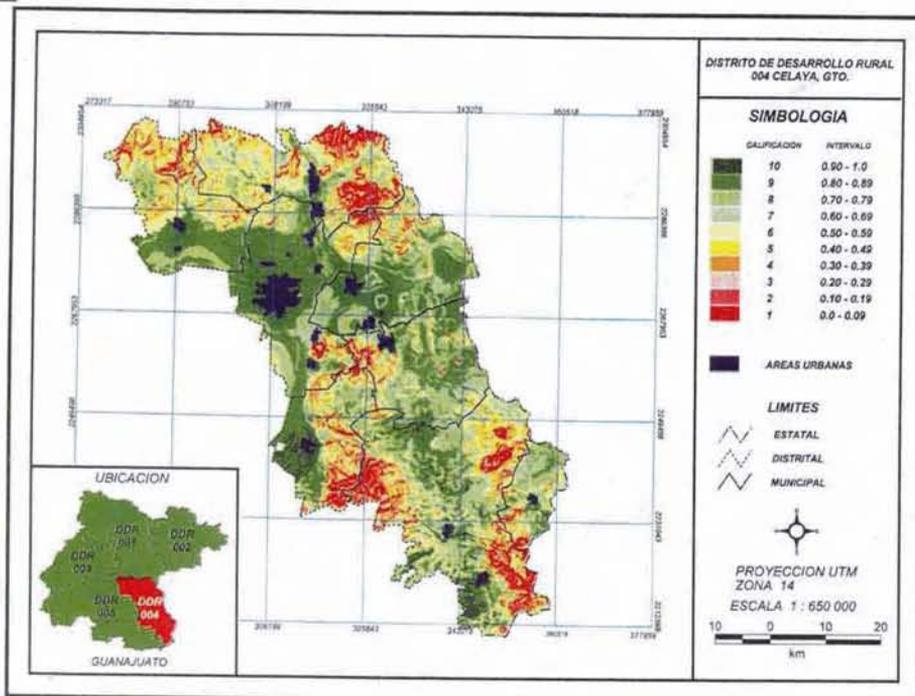


Figura 4. Clasificación fuzzy para agricultura de temporal.

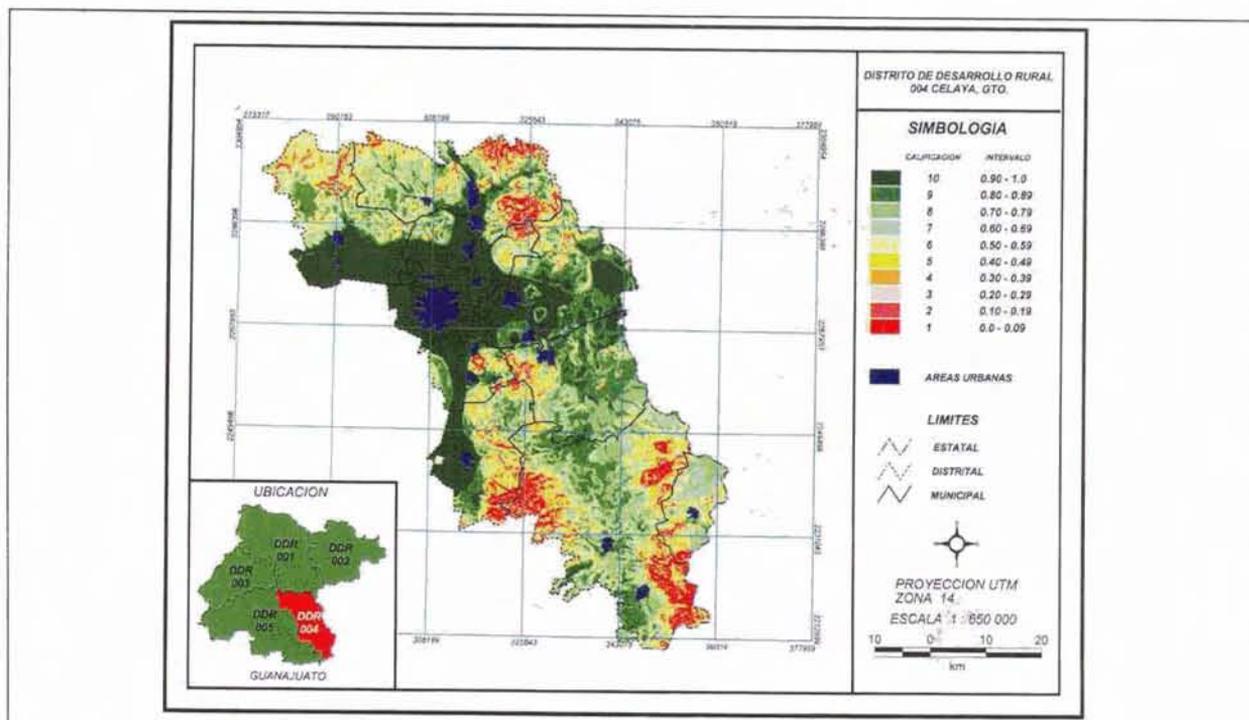


Figura 5. Clasificación fuzzy para agricultura de riego.

mejorados a futuro mediante experimentos de productividad dirigidos a las áreas que representen la variación climática y edáfica del área en estudio, lo que permitiría generar información más confiable.

En estos experimentos sería posible, además, separar la contribución de los factores controlables de la producción de cultivos al controlar el manejo de los mismos.

REFERENCIAS

- Altman, D. (1994), "Fuzzy set theoretic approaches for handling imprecision in spatial analysis", *Int. J. Geographical Information Systems*, vol. 8, núm. 3, pp. 271-289.
- Ball, G. L. (1993), *Introduction to Geographic Information Systems. Lecture and Exercise Notes*, School of Renewable Natural Resources, University of Arizona.
- Burrough, P. A. (1989), "Fuzzy mathematical methods for soil survey and land evaluation", *Journal of Soil Science*, vol. 40, núm. 3, pp. 477-492.
- Berry, J. K. (1993), "Overlaying Maps and Characterizing Error Propagation", *Beyond Mapping. Concepts, Algorithms, and Issues in GIS*. GIS World Books, GIS World, Inc. Fort Collins, Colorado, USA.
- CETENAL (1972), *Cartas topográficas del estado de Guanajuato*, escala 1:50 000, Secretaría de Programación y Presupuesto, México.
- CETENAL (1973), *Cartas de edafología del estado de Guanajuato*, escala 1:50 000, Secretaría de Programación y Presupuesto, México.
- Davidson, D. A., S. P. Theocharopoulos y R. J. Bloksma (1994), "A land evaluation project in Greece using GIS and based on Boolean and fuzzy methodologies", *Int. J. Geographical Information Systems*, vol. 8, núm. 4, pp. 369-384.
- FAO (1978), Report on the Agro-Ecological Zones Project. Vol. 1: Methodology and Results for Africa, *World Soil Resources Report 48/1*, FAO, Rome.
- FAO (1981), Informe del Proyecto de Zonas Agroecológicas. Vol 3. Metodología y resultados para América del Sur y Central, *Informe sobre recursos mundiales de suelos 48/3*, FAO, Roma.
- Fisher, P. F. (1994), "Probable and fuzzy models of the viewshed operation", *Innovations in GIS 1*, (Taylor and Francis), pp. 161-175.
- García N., H., A. Tapia N., F. Galván C. y C. Mejía A. (1992), "Clasificación de las tierras de labor del estado de Guanajuato para la producción de maíz, frijol y trigo de temporal", *Memorias del XXV Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo*, Acapulco, Guerrero, México.
- González A., I. J., A. Turrent F. R. Avelaño S. (1990), *Provincias Agronómicas de las tierras de labor bajo temporal en México*, SARH, INIFAP, México.
- INEGI (1993), *Anuario estadístico del estado de Guanajuato*. Edición 1993, Aguascalientes, México.
- Ortiz V., R. Moreno S. y R. A. Martínez P. (1992), *Determinación del potencial productivo de especies vegetales para el estado de Puebla*, Publicación técnica No. 1, SARH-INIFAP-CIRCE-Campo Experimental Cholula, Puebla, México.
- SPP (1980), *Síntesis geográfica de Guanajuato*, México.
- Suí, D. Z. (1994), "Fuzzy logic can help GIS cope with reality", *GIS World*, vol. 7, núm. 9, pp. 50-53.
- Tang, H., J. Debayeye, Ruanda y E. Van Ranst (1991), "Land suitability classification based on fuzzy set theory", *Pedologie*, vol. XLI, núm. 3, pp. 277-290.
- Tang, H. y E. Van Ranst (1992), "Testing of fuzzy set theory in land suitability assessment for rainfed grain maize production", *Pedologie*, vol. XLII, núm. 2, pp. 129-147.
- Tang, H. y D. Ruan (1992), Land use suitability assessment for irrigated maize based on fuzzy set theory, *Sustainable Irrigation*.
- Turrent F., A. (1986), *Estimación del potencial productivo actual de maíz y frijol en la República Mexicana*, Colegio de Posgraduados Chapingo, México.
- Van Ranst, E., H. Tang, H., R. Groenemans y S. Sinthurath (1996), "Application of fuzzy logic to land suitability for rubber production in peninsular Thailand", *Geoderma*, vol. 70 (1996), pp. 1-19.
- WCDP (1992), *CLICOM Project. Reference manual of the world climate data program. Version 3.0*. United Nations Organization, EUA.