

Determinación de la aptitud del terreno para maíz mediante análisis espacial multicriterio en el Estado de México*

Determining the suitability of the land for maize by multi-spatial analysis in the State of Mexico

Erasto Domingo Sotelo Ruiz^{1§}, Gustavo Manuel Cruz Bello², Antonio González Hernández³ y Francisco Moreno Sánchez³

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Carretera Toluca-Zitácuaro, km 4.5. Vialidad Adolfo López Mateos, Colonia San José Barbabosa; Zinacantepec, Estado de México. C. P. 51350. Tel: 722 278-43-31. ²Laboratorio de Análisis Socioterritorial. Universidad Autónoma Metropolitana Cuajimalpa. Av. Vasco de Quiroga 4871, Col. Santa Fe Cuajimalpa, Ciudad de México C. P. 05348. (gcruzbel07@gmail.com). ³Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro Nacional de Investigaciones Disciplinaria en Conservación y Mejoramiento de Ecosistemas Forestales. Av. Progreso No. 5, Barrio de Santa Catarina, Del. Coyoacán. C. P. 04010. México, D. F. [§]Autor para correspondencia: soteloe@colpos.mx.

Resumen

El maíz es el grano de mayor consumo a nivel mundial, para la alimentación de la población, el ganado y en la industria; sin embargo, su producción y rendimientos son cada día menores; por lo tanto, es indispensable la identificación y delimitación de áreas con potencial para el desarrollo y producción del maíz para ayudar a satisfacer la demanda de este grano. El objetivo de esta investigación fue generar y aplicar una metodología de análisis multicriterio como una alternativa para la zonificación y delimitación de las zonas con aptitud para maíz. El trabajo se realizó para el Estado de México. Se utilizó la información de clima, suelo y fisiografía, donde a cada variable se le dio un valor numérico, según la influencia que tienen en la adaptación, desarrollo y rendimiento del maíz. Los resultados muestran que el Estado de México presenta 471 902 y 244 718 ha de muy buena y buena productividad para maíz de temporal. Las variables que tienen un mayor peso en la definición de la adaptación del maíz son la temperatura, altura, precipitación y tipos de suelos.

Palabras clave: delimitación, identificación, potencial productivo y zonificación.

Abstract

The maize is the most widely consumed grain worldwide, to feed the population, livestock and industry; however, production and yields are decreasing day; therefore, it is essential to the identification and delimitation of areas with potential for development and production of maize to help meet the demand for grain. The objective of this research was to generate and implement a methodology for multi-criteria analysis as an alternative for zoning and delimitation of areas with aptitude for maize. The work was done for the State of Mexico. The information climate, soil and topography, where each variable is given a numerical value, according to the influence they have on the adaptation, development and yield of maize was used. The results show that the State of Mexico has 471 902 and 244 718 has very good and good productivity for rainfed maize. The variables that have a greater say in defining adaptation of maize are temperature, altitude, rainfall and soil types.

Keywords: demarcation, identification, production potential and zoning.

Introducción

El maíz, el trigo, el arroz, la papa y el frijol son la base de la alimentación de la población mundial; de éstos cultivos, el maíz es el más sembrado en todo el mundo y de mayor consumo por la población (Nadal y Wise, 2005; Barros, 2009; Paredes *et al.*, 2009; FAO, 2011).

Actualmente en México, como en otras partes del planeta, existe una crisis alimentaria, la cual se deriva de la aplicación de tecnologías inadecuadas y de la mala selección de sitios de cultivo. Así por ejemplo, el rendimiento promedio de maíz en el mundo es 4.4 t ha^{-1} y en México alcanza sólo las 2.5 t ha^{-1} , aunque hay regiones donde el rendimiento promedio rebasa las ocho toneladas en condiciones de temporal (Romero y Puyana, 2004). El problema es la mala selección de las zonas potenciales y la aplicación de tecnologías inadecuadas; por lo tanto, es necesario el desarrollo e implementación de conocimiento científico para resolver estos problemas. Una forma de lograrlo es a través de la generación e instrumentación de metodologías para identificar las zonas con aptitud para el cultivo del maíz.

Estas metodologías deben considerar tanto los requerimientos del cultivo como las características particulares del entorno, para garantizar un uso adecuado del terreno, con alta producción y el menor impacto al ambiente (Perales, 2009; UCCS, 2009). En este sentido los tomadores de decisiones del sector agrícola requieren de estudios sobre la capacidad del territorio para la siembra de cultivos con el objeto de instrumentar programas de desarrollo regional que impulsen la producción y ayuden a la capitalización de los productores rurales (Jordan, 2008; Stuart y Emerson, 2009). En particular, Osorio *et al.* (2012) y Trueba (2012) concluyen que existe una demanda continua de tecnología de producción y localización de nuevas áreas para la producción de maíz en México.

Para la evaluación de las tierras, existen métodos cualitativos, índices de productividad y modelos de simulación matemática, los que pueden ser usados en forma separada o combinados (Van Lanen *et al.*, 1992). Entre las metodologías de identificación y delimitación de zonas potenciales para el desarrollo de los cultivos, destacan la de zonificación agroecológica (FAO, 1978; FAO, 1981; FAO, 1997; IIASA/FAO, 2012), la de provincias agronómicas para maíz de temporal (Turrent, 1986; Turrent *et al.*, 1992; Turrent, 2009) y la de determinación del potencial productivo de especies vegetales (Medina *et al.*, 1997).

Introduction

Maize, wheat, rice, potatoes and beans are the staple food of the world population; of these crops, maize is the most widely planted worldwide and increased consumption by the population (Nadal and Wise, 2005; Barros, 2009; Paredes *et al.*, 2009; FAO, 2011).

Currently in Mexico, as in other parts of the world, there is a food crisis, which is derived from the application of inappropriate technologies and poor selection of cultivation sites. For example, the average yield of maize in the world is 4.4 t ha^{-1} and Mexico reached only 2.5 t ha^{-1} , although there are regions where the average yield exceeds eight tonnes under rainfed conditions (Romero and Puyana, 2004). The problem is the poor selection of potential areas and the implementation of inappropriate technologies; therefore, the development and implementation of scientific knowledge to solve these problems is needed. One way to achieve this is through the creation and implementation of methodologies to identify areas with suitability for cultivation of maize.

These methodologies should consider both crop requirements and the particular characteristics of the environment, to ensure proper use of the soil with high production and less impact on the environment (Perales, 2009; UCCS, 2009). In this regard the decision makers in the agricultural sector require studies on the ability of the land to plant crops in order to implement regional development programs to boost production and help the capitalization of rural producers (Jordan, 2008; Stuart and Emerson, 2009). In particular, Osorio *et al.* (2012) and Trueba (2012) conclude that there is a continuing demand for production technology and locating new areas for maize production in Mexico.

For the evaluation of the land, there are qualitative methods, rates of productivity and mathematical simulation models, which can be used separately or combined (Van Lanen *et al.*, 1992). Among the methodologies for identifying and delimiting potential for crop development, highlight the areas of agro-ecological zoning (FAO, 1978; FAO, 1981; FAO, 1997; IIASA/FAO, 2012), the agronomic provinces rainfed maize (Turrent, 1986; Turrent *et al.*, 1992; Turrent, 2009) and the determination of the productive potential of plant species (Medina *et al.*, 1997).

La metodología de la FAO consiste en calificar el clima, el suelo y las prácticas de manejo. Las zonas agroecológicas se definen como aquellas que tienen combinaciones similares de clima, suelo y el mismo potencial biológico-físico para la producción agrícola (FAO, 1981; FAO, 1985; FAO, 1997; IISA/FAO, 2012). Parra (1989) menciona que su importancia radica en la obtención de datos sobre la superficie potencial desde el punto de vista de clima y suelo para la producción de los cultivos.

Por su parte, Turrent (1986), Turrent *et al.* (1992) y Turrent (2009) proponen una metodología para la identificación y delimitación de las provincias agronómicas para maíz bajo condiciones de temporal, la cual se basa en el cociente que resulta de la división de la precipitación entre la evaporación del período de junio a septiembre y la profundidad del suelo. Ésta se aplicó a nivel nacional y para el Estado de México.

Finalmente, el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) propuso la metodología para determinar el potencial productivo de especies vegetales y fue uno de los primeros intentos por delimitar las zonas potenciales para cultivos (INIFAP, 1995). En esta línea Medina *et al.* (1997) formulan otra metodología para determinar el potencial productivo de especies vegetales en México, la cual consiste en modelar con sistemas de información geográfica datos de clima, suelo y fisiografía, según los requerimientos de los cultivos.

La teoría de decisiones es un enfoque de gran aplicación en las ciencias ambientales, tales como: la evaluación del impacto ambiental, proyectos de desarrollo regional y la planificación territorial (Valerie y Steward, 2002; García, 2004a). Romero (1993) menciona que los procesos de toma de decisiones, tradicionalmente se basan en técnicas que buscan las soluciones factibles que presenten un mayor grado de precisión. Entre estas técnicas se encuentra el análisis multicriterio, el cual ayuda a los tomadores de decisiones a evaluar los juicios de valor de los expertos para sistemáticamente analizar problemas complejos identificando las alternativas de decisión, así como los criterios y su importancia (peso) en la evaluación del desempeño de las alternativas para cumplir con el objetivo deseado. Estos métodos matemáticamente combinan los criterios y sus pesos para ayudar en la selección de la alternativa más deseable (Partovi and Hopton, 1994; Malczewski, 1999; Kiker *et al.*, 2005; Malczewski, 2006).

The methodology of FAO is to review the climate, soil and management practices. The agro-ecological zones are defined as those which have similar combinations of climate, soil and the same biological-physical potential for agricultural production (FAO, 1981; FAO, 1985; FAO, 1997; IISA/FAO, 2012). Parra (1989) mentions that its importance lies in obtaining data on the potential surface from the point of view of climate and soil for crop production.

Meanwhile, Turrent (1986), Turrent *et al.* (1992) and Turrent (2009) propose a methodology for the identification and delineation of the agricultural provinces for maize under rainfed conditions, which is based on the quotient resulting from dividing the evaporation of rainfall between period June to September and soil depth. It was applied at national level and for the State of Mexico.

Finally, the National Institute of Forestry, Agriculture and Livestock (INIFAP) proposed methodology to determine the production potential of plants and was one of the first attempts to define potential areas for cultivation (INIFAP, 1995). In this line Medina *et al.* (1997) formulated another methodology to determine the productive potential of plant species in Mexico, which consists of modeling with geographical data on climate, soil and topography, according to crop requirements.

Decision theory is an approach widely used in environmental sciences, such as: environmental impact assessment, projects of regional development and territorial planning (Valerie y Steward, 2002; García, 2004a). Romero (1993) mentions that the decision-making processes traditionally rely on techniques that seek feasible solutions which have a higher degree of accuracy. These techniques include multi-criteria analysis, which helps decision makers assess the value judgments of experts to systematically analyze complex problems by identifying the decision alternatives, and the criteria and their importance (weight) in the evaluation is performance alternatives to meet the desired objective. These methods mathematically combine the criteria and their weights to help in selecting the most desirable alternative (Partovi and Hopton, 1994; Malczewski, 1999; Kiker *et al.*, 2005; Malczewski, 2006).

Multi-criteria analysis is a process of continuous and cyclical learning, which begins with an analysis of the decision context, is the definition of the different elements of the evaluation model and returns to the initial phase, until it

El análisis multicriterio es un proceso de aprendizaje continuo y cíclico, que comienza con un análisis del contexto de decisión, pasa por definir los diferentes elementos del modelo de evaluación y vuelve a la fase inicial, hasta que se logra definir una estructura de evaluación estable, que proporcione la certeza y el resultado óptimo. El resultado final del análisis es una valoración numérica de las opciones, el cual permite tomar una decisión que se puede justificar tanto cualitativa como cuantitativamente; al cabo del análisis se puede explicar, en detalle, las razones de la elección (Jankowski, 1995; Valerie and Steward, 2002; Sánchez, 2010).

El análisis multicriterio se convierte entonces en una herramienta muy útil para la toma de decisiones, ya que da una alta certeza y probabilidad de éxito de las acciones implementadas (Geneletti, 2007; Goodwin and Wright, 2014). Esta técnica ha sido usada por varios autores para identificar áreas de conservación (Rothley, 1999; Geneletti, 2004; Valente and Vettorazzi, 2008) y zonas de prioridad para reforestación (Espelta *et al.*, 2003; Gkaraveli *et al.*, 2004; Kangas and Kangas, 2005; Cruz y Sotelo, 2013). Dada la relevancia del maíz a nivel mundial, es necesario identificar las zonas con mejor aptitud, lo que permitirá orientar las estrategias de desarrollo rural para garantizar una mayor producción, capitalización de los productores, un menor impacto al ambiente y una mejor capacidad de adaptación al cambio climático. En este sentido el objetivo de esta investigación fue generar y aplicar una metodología de análisis multicriterio como una alternativa para la zonificación y delimitación de las zonas con aptitud para maíz.

Materiales y métodos

Localización del área de estudio

El Estado de México se localiza entre los 18° 22' 14" y los 20° 17' 22" de latitud norte y entre los 98° 35' 35" y los 100° 36' 19" de longitud oeste (Figura 1). Tiene una superficie de 24 303.86 km². Los climas en el estado son: templado, semifrío, cálido, semi-cálido y frío. La temperatura media anual va de 6 °C a 28 °C; la precipitación anual de 600 a 1 800 mm; mientras que la altitud varía entre los 340 y 5 100 m (INEGI, 1988; García, 2004b; INEGI, 2006). Los suelos dominantes son: Andosol, Feozem, Vertisol, Regosol y Arenosol (INEGI, 2006; Sotelo *et al.*, 2010).

manages to define a stable structure evaluation, to provide the certainty and the optimal result. The end result of the analysis is a numerical value of the options, which allows you to take a decision can be justified both qualitatively and quantitatively; After the analysis can be explained, in detail, the reasons for choosing (Jankowski, 1995; Valerie and Steward, 2002; Sánchez, 2010).

Multi-criteria analysis then becomes a useful tool for decision-making, as it gives a high certainty and probability of success of the implemented actions (Geneletti, 2007; Goodwin and Wright, 2014). This technique has been used by several authors to identify conservation areas (Rothley, 1999; Geneletti, 2004; Valente and Vettorazzi, 2008) and priority areas for reforestation (Spelt *et al.*, 2003; Gkaraveli *et al.*, 2004; Kangas and Kangas, 2005; Cruz and Sotelo, 2013). Given the importance of maize in the world, it is necessary to identify areas with better fitness, which will guide rural development strategies to ensure increased production, capitalization of producers, lower impact on the environment and better adaptability to climate change. In this sense, the objective of this research was to generate and implement a methodology for multi-criteria analysis as an alternative for zoning and delimitation of areas with aptitude for maize.

Materials and methods

Location of the study area

The State of Mexico is located between 18° 22' 14" and 20° 17' 22" north latitude and between 98° 35' 35" and 100° 36' 19" W (Figure 1). It has an area of 24 303.86 km². Climates in the state are: mild, semi-cold, warm, semi-warm and cold. The average annual temperature is 6 °C to 28 °C; annual rainfall of 600 to 1 800 mm; while the altitude varies between 340 and 5 100 m (INEGI, 1988; García, 2004b; INEGI, 2006). The dominant soils are andosol, feozem, vertisol, regosol and arenosol (INEGI, 2006, Sotelo *et al.*, 2010).

Methodology

To determine the suitability of the land for maize in the State of Mexico, a multi-criteria analysis using the technique Simple Miltiattribute Rating Technique

Metodología

Para determinar la aptitud del terreno para maíz en el Estado de México se instrumentó un análisis multicriterio mediante la técnica Simple Multiattribute Rating Technique (SMART); (Edwards and Barrón 1994; Stewart and Joubert, 2007; Goodwin y Wright, 2014). Cuya parte esencial consistió en determinar la importancia (peso) de cada variable y estandarizar sus valores considerando su significado en términos de aptitud del terreno para maíz.

Así, el peso relativo de cada criterio se definió asignándole valores de 0 a 100 de menor a mayor importancia, respectivamente. Dado que cada criterio tiene su propia escala y unidades de medida fue necesario estandarizarlos para su inclusión sin sesgos en el análisis. En la estandarización, los valores de cada criterio se transformaron a valores de aptitud. Todas las variables o criterios empleados se consideraron con una escala discreta (clases), por lo que se empleó una calificación directa para asignarle un valor de aptitud a cada clase resultante (Goodwin y Wright, 2014).

Las variables consideradas para clima fueron: temperatura y precipitación; para suelo: tipo de suelo, fases, texturas y profundidad; y para fisiografía: altura y pendiente. Para cada variable, se generaron capas digitales con una resolución espacial de 100 m que se integraron y analizaron mediante sistemas de información geográfica Idrisi y ArcGis (Eastman, 2001; ESRI, 2010).

La información de clima se obtuvo de las estaciones climatológicas que se distribuyen en el estado y de las colindantes en estados vecinos. Se incluyeron las estaciones con diez años de registros y que contaron con datos de precipitación, evaporación, temperatura máxima, mínima y media (García, 2004b). Estas variables se interpolaron con ArcGis, para generar mapas mensuales.

Los datos de suelo se digitalizaron con Arc/Info versión 6.0 (ESRI, 1992) de las cartas 1:50 000 del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) que cubren el Estado de México (INEGI, 1988). La base de datos generada incluyó información de: Unidades de suelos, fases físicas, textura, fases químicas, suelos profundos y suelos delgados (IUSS Working Group WRB, 2006; ESRI, 2010; Sotelo *et al.*, 2010). El modelo de elevación digital se descargó directamente de la página del INEGI (INEGI, 2012), del cual se derivó la capa de porcentaje de pendiente del terreno

(SMART) was implemented; (Edwards and Barron 1994; Stewart and Joubert, 2007; Goodwin and Wright, 2014). Which essential part it was to determine the importance (weight) of each variable and standardize its values considering their significance in terms of suitability of the land for maize.

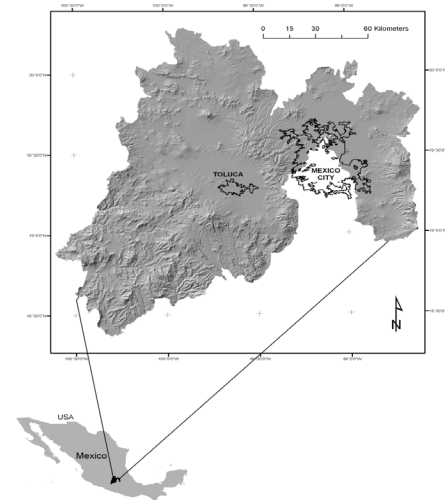


Figura 1. Estado de México, donde se realizó el estudio.
Figure 1. State of Mexico, where the study was conducted.

Thus, the relative weight of each criterion was defined by assigning values 0-100 from lowest to highest importance, respectively. Since each test has its own scale and measurement units was necessary to standardize unbiased inclusion in the analysis. In standardization, the values of each criterion is transformed fitness values. All variables or criteria used were considered a discrete scale (classes), so that a direct qualification is used to assign a fitness value to each resulting class (Goodwin and Wright, 2014).

The climate variables were considered for temperature and precipitation; floor: soil type, stage, texture and depth; and physiography: height and slope. For each variable were generated, digital layers with a spatial resolution of 100 m were integrated and analyzed geographic information using Idrisi and ArcGIS (Eastman, 2001; ESRI, 2010).

Weather information obtained from the weather stations spread across the state and adjoining neighboring states. stations with ten years of records are included and counted on rainfall data, evaporation, maximum temperature, minimum and average (Garcia, 2004b). These variables were interpolated with ArcGIS to generate monthly maps.

mediante ARCGIS 9.3 (ESRI, 2010). Los requerimientos para maíz se obtuvieron de la página de la FAO y se adecuaron a las condiciones del Estado de México (FAO, 2013).

Modelado para maíz de temporal con la metodología multicriterio

Una vez que se definieron los pesos y se generaron las capas digitales para cada variable, se determinó para cada pixel la aptitud del terreno para el maíz mediante una combinación lineal ponderada (Malczewski, 1999):

$$p = \sum_{i=1}^n w_i x_i \quad 1)$$

Donde: p = aptitud del terreno para el cultivo de maíz; w_i = peso del criterio i ; x_i = valor estandarizado del criterio i para cada pixel.

Los valores obtenidos de aptitud del terreno para el maíz fueron ordenados en cinco categorías: muy buena, buena, mediana, baja y no apta. Al final de la modelación se adicionaron los cuerpos de agua y las zonas urbanas, ya que estas son importantes pero no son propicias la agricultura.

Resultados y discusión

Las variables utilizadas y su respectiva calificación se muestran en el Cuadro 1, donde las variables de mayor peso son la temperatura, altura y la precipitación.

Los pesos e intervalos de cada variable y su calificación se presentan en el Cuadro 2.

The soil data were digitized with Arc/Info 6.0 (ESRI, 1992), 1:50 000 letters from the National Institute of Statistics, Geography and Informatics (INEGI) covering the State of Mexico (INEGI, 1988). The database included information generated: units of soils, physical phases, texture, chemical phases, deep soils and shallow soils (IUSS Working Group WRB, 2006; ESRI, 2010; Sotelo *et al.*, 2010). The digital elevation model was downloaded directly from the page INEGI (INEGI, 2012), which layer percent slope terrain using ArcGIS 9.3 (ESRI, 2010) was derived. The requirements for maize were obtained from the website of the FAO and were adapted to the conditions of the State of Mexico (FAO, 2013).

Modeling for maize under the multicriteria approach

Once the weights are defined and digital layers for each variable were generated, it was determined for each pixel fitness field for maize by a weighted linear combination (Malczewski, 1999):

$$p = \sum_{i=1}^n w_i x_i \quad 1)$$

Where: p = suitability of the land for growing maize; w_i = weight of criterion i ; x_i = i standardized criteria for each pixel value.

The values obtained aptitude of the land for maize were sorted into five categories: very good, good, medium, low and unfit. At the end of the shaping bodies of water and added urban areas, as these are important but not conducive agriculture.

Cuadro 1. Requerimientos agroecológicos y calificación de las variables para maíz de temporal para el Estado de México. Table 1. Requirements and agro-ecological characterization of the variables for rainfed maize for the State of Mexico.

Variable	Requerimiento	Calificación	Peso normalizado
Temperatura	10-40 °C	100	24
Altura	1-2 900 msnm	90	22
Precipitación	400-1 600 mm	85	20
Tipos de suelos	Profundos y delgados	80	19
Fase de suelos	Físicas y químicas	30	8
Textura	1-12	20	5
Pendiente	0-45%	10	2

Cuadro 2. Variables, intervalos y su calificación en la definición del potencial del maíz de temporal en el Estado de México.
Table 2. Variables, intervals and their qualification in defining the potential of rainfed maize in the State of Mexico.

Variable	Categorías	Intervalo	Valor
Temperatura (°C)	Muy bueno	15-22	100
	Bueno	22-28	85
	Mediano	28-32 y 12-15	70
	Bajo	10-12 y 32-40	20
	No apto	< 10 y > 40	10
Altura (msnm)	Muy bueno	1 200- 2 200	100
	Bueno	2 200- 2 700	95
	Mediano	0-1 200	75
	Bajo	2 700- 2 900	20
	No apto	> 2 900	10
Precipitación (mm)	Muy bueno	600- 800	100
	Bueno	800- 1 200	95
	Mediano	500- 600 y 1 200- 1 400	75
	Bajo	400-500 y 1 400- 1 600	20
	No apto	< 400 y > 1600	10
Tipos de suelos	Muy bueno	Andosol y Feozem	100
		Vertisol	95
		Fluvisol	90
	Bajo	Planosol	85
		Cambisol	80
		Histosol	75
		Regosol	70
		Acrisol	50
		Luvisol	45
		Leptosol	20
No apto	Solonchak y Gleysol	10	
Fases físicas y químicas	Muy Bueno	Sin fases	100
	Bueno	Dúrica profunda	95
	Mediano	Lítica profunda	90
		Petrocálcica y dúrica	80
	Bajo	Gravosa	40
		Pedregosa y lítica	30
No apto	Salina y sódica	10	
Texturas	Muy bueno	Media	100
	Bueno	Fina	95
	Media	Gruesa	75
Pendiente (%)	Muy bueno	0-8	100
	Bueno	8-15	95
	Mediano	15-30	80
	Bajo	30-40	20
	No apto	>45	10

Zonas potenciales para maíz

La superficie resultante para cada una de las categorías de aptitud después de la modelación, para el Estado de México fue: muy buena 471 902 ha, buena 244 718, mediana 497 404, baja 556 638 y no apta 430 396 ha; la superficie restante de 211 081 y 18 246 ha corresponden a zonas urbanas y cuerpos de agua respectivamente (Figura 2).

Para el Estado de México, el SIAP (2013) reporta 542 528 ha sembradas de maíz, por lo que podemos decir que existe una gran diferencia con respecto a la superficie potencial resultante en esta investigación; solamente para las categorías de muy buena y buena resultan 471 902 y 244 718 ha respectivamente, por lo que estas dos categorías rebasan la superficie sembrada en 174 mil ha; además, la categoría de mediana presenta 497 404 ha que es una zona que tiene buenos rendimientos. Con estas tres categorías, la zona potencial resultante en esta investigación es de 1 214 024 ha, la cual duplica la superficie sembrada con maíz para el Estado de México. Con base a los resultados el estado tiene superficie potencial para maíz, solo hace falta que se tomen en cuenta estudios como este para la implementación y selección de las mejores zonas para la siembra; por lo tanto, la superficie y los rendimientos serán mayores, lo cual ayudará a abastecer de este valioso grano, para consumo al mercado nacional y del estado.

Estudios similares a la presente investigación, para la identificación de las zonas potenciales para el desarrollo y producción de los cultivos están los de Osorio *et al.* (2012) quienes mencionan que existe una demanda continua para identificar nuevas áreas para la producción de maíz en México y el mundo, por lo que cada año se impulsa la investigación para generar nuevas metodologías para la identificación de zonas con potencial para este cultivo. Löffler *et al.* (2005) mencionan que la eficiencia de un sistema de evaluación de tierras depende del detalle de la información de clima, suelo y de la genética del cultivo en estudio. Hack-ten *et al.* (1993) establecen que en la evaluación de tierras, la productividad y los efectos ambientales deben ser investigados con información de los tipos de suelos y usos de la tierra.

Por su parte, Van Diepen (1993) propuso dos opciones metodológicas para la evaluación del potencial de rendimiento de granos en cultivos importantes en la Comunidad Europea, las cuales son comparadas con el método de las zonas agroecológicas. Shahbazi y Jafarzadeh (2010) utilizan el sistema automatizado de evaluación de tierras de la FAO (MicroLEIS)

Results and discussion

The variables used and their respective rating are shown in Table 1, wherein the variables are temperature greater weight, height and precipitation.

Weights and ranges of each variable and its classification are presented in Table 2.

Potential areas for maize

The resulting surface for each of the categories of fitness after modeling for the State of Mexico was very good 471 902 ha, good 244 718; 497 404 Medium, Low 556 638; and unfit 430 396 ha, the remaining area of 211 081 and 18 246 ha are urban areas and water bodies respectively (Figure 2).

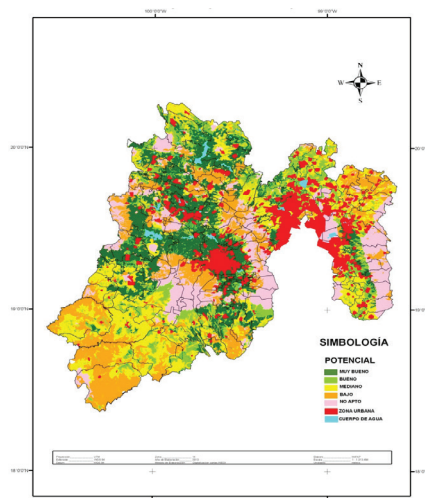


Figura 2. Zonas potenciales resultantes para maíz de temporal con la metodología multicriterio en el Estado de México.

Figure 2. Potential Areas accruing to maize under the multicriteria approach in the State of Mexico.

For the State of Mexico, the SIAP (2013) reports 542 528 ha planted maize, so we can say that there is a great difference to the resulting surface potential in this investigation; only for the categories of very good and good are 471 902 and 244 718 ha respectively, so these two categories exceed the area planted in 174 000 ha; moreover the middle has 497 404 ha is an area that has good yields. With these three categories, the resulting potential in this research area is 1 214 024 ha, which doubles the area planted to maize for the State of Mexico. Based to the results the state has surface potential for maize, it only needs to be taken into account studies like this for the implementation and selection of the best areas

para evaluaciones agro-ecológicas, quienes concluyen que es una herramienta excepcional para hacer recomendaciones para la agricultura y el medio ambiente.

Entre los estudios para identificar la adaptabilidad del maíz, están los de Ruiz *et al.* (2008) quienes determinaron el rango de adaptación climática y altitudinal de 42 razas de maíz en México; los intervalos que encontraron para altura va de 0 a 2,900 msnm, temperatura media anual de 11.3 a 26.6 °C, precipitación de 426 a 4 225 mm anuales y de 12.46 a 12.98 h luz. Además, María (2008) realiza una evaluación de las unidades de producción de maíz y concluye que se deben de tomar en cuenta las características socioeconómicas, el clima y el suelo para este tipo de estudios.

Gutiérrez *et al.* (2003) utilizan una clasificación numérica para delimitar la adaptación de diferentes híbridos y variedades de maíz, la cual produce grupos con características claras en términos de variables numéricas; encontraron una probabilidad de 0.966 en su clasificación. Camas *et al.* (2010) aplicaron la metodología del sistema automatizado de evaluación de tierras de la FAO, donde generaron un modelo para planificar el establecimiento de maíz de temporal y concluyen que el sistema automatizado de zonificación agroecológica permite delimitar el establecimiento del maíz. Con respecto a estudios de zonificación agroecológica para maíz de temporal está el de Ortiz (1986) quien determinó 17 611 500 ha muy aptas a nivel nacional. Aplicando esta misma metodología Márquez (1990) delimitó las zonas agroecológicas para maíz en el Estado de México, donde determinó 365 297 ha muy aptas.

En esta investigación, la superficie de muy buen potencial obtenida es de 471 902 ha. Como podemos observar, existen diferencias con respecto a la superficie de muy buena productividad y muy aptas con respecto a la de esta investigación; la superficie obtenida en esta investigación es mayor por 30 722 ha con respecto al estudio de Sotelo *et al.* (2012) quienes tienen la superficie más cercana. Los resultados de esta investigación son altos y exactos; por lo que coinciden con lo que menciona Malczewski (1999) y Malczewski (2006) quien menciona que la modelación con sistemas de información geográfica y la metodología multicriterio produce resultados muy precisos y confiables, los cuales son una herramienta para tomar decisiones en la planeación y zonificación de cultivos.

Las diferentes metodologías para la identificación y delimitación de las zonas potenciales para el maíz dependen de la información disponible y del detalle de la misma; el modelado de la información se facilita con el uso de los

for planting; therefore, the area and yields will be higher, which will help supply this valuable grain for consumption in the domestic market and the state.

Similar studies with this research, to identify potential areas for development and production of crops are those of Osorio *et al.* (2012) who mentioned that there is a continuing demand to identify new areas for maize production in Mexico and the world, so that each year the research to generate new methodologies for the identification of areas with potential for this crop is driven. Löffler *et al.* (2005) mention that the efficiency of a system of land evaluation depends on the detail of information of climate, soil and crop genetics study. Hack-ten *et al.* (1993) state that in evaluating land productivity and environmental effects must be investigated with information on soil types and land uses.

For his part, Van Diepen (1993) proposed two methodological options for evaluating the potential for grain yield in major crops in the European Community, which are compared with the method of the agro-ecological zones. Shahbazi and Jafarzadeh (2010) use the automated land evaluation of FAO (MicroLEIS) for agro-ecological assessments who conclude that it is an exceptional tool to make recommendations for agriculture and the environment.

Among the studies to identify the adaptability of maize, they are those of Ruiz *et al.* (2008) who determined the range of climate adaptation and altitudinal 42 races of maize in Mexico; the intervals found for height ranges from 0 to 2 900 m, annual average temperature of 11.3 to 26.6 °C, rainfall of 426-4 225 mm per year and 12.46 to 12.98 hours light. In addition, Mary (2008) performed an assessment of the production units and concludes that maize should be taken into account socioeconomic characteristics, climate and soil for this type of study.

Gutiérrez *et al.* (2003) used a numerical rating to narrow the adaptation of different varieties and hybrids of maize, which produces groups with clear characteristics in terms of numerical variables; They found a probability of 0.966 in its classification. Beds *et al.* (2010) applied the methodology of automated land evaluation of FAO, which generated a model for planning the establishment of rainfed maize and conclude that the automated system of agro-ecological zoning allows targeted setting of maize. With regard to agro-ecological zoning studies for seasonal maize is that of Ortiz (1986) who determined 17 611 500 has very suitable nationally. Applying the same methodology Márquez (1990) agro-ecological zones delimited for maize in the State of Mexico, where he found 365 297 has very suitable.

sistemas de información geográfica. Finalmente, podemos decir que la presente metodología es una buena alternativa para conocer las zonas con las mejores condiciones de suelos, clima y fisiografía para el desarrollo y producción del maíz de temporal en el Estado de México; los resultados obtenidos con esta metodología, superan a todos los presentados por otros investigadores y metodologías.

Conclusiones

La metodología de análisis multicriterio le asigna valores numéricos a las variables utilizadas y a sus intervalos de adaptación, los cuales se estratifican para la definición y delimitación de las zonas potenciales, lo cual es más exacto.

La metodología multicriterio generada y utilizada en esta investigación para delimitar las zonas potenciales para maíz de temporal determinó una superficie de 1 214 024 ha para las categorías de muy buena, buena y mediana, las cuales tienen altos rendimientos y duplican la superficie sembrada de maíz para el Estado de México.

La mayor superficie potencial se concentra en zonas que presentan las mejores condiciones de clima (temperatura y precipitación), tipos de suelos y altura que son las variables con un mayor peso en la definición de las zonas de adaptación del maíz con la presente metodología.

Las variables que tienen mayor peso en la adaptación del maíz, para el Estado de México, son temperatura, altura, precipitación y tipo de suelos.

Literatura citada

- Barros C. 2009. Maíz alimentación y cultura. Ciencias. 92-93:56-59.
- Camas, G. R.; Turrent, F. A.; López, M. J.; Cadena, I. P.; Villar, S. B.; Reynol, M. G. R.; Cruz, C. F. y Cortes, F. J. I. 2010. Evaluación automatizada de tierras para el cultivo de ajonjolí en relevo a Maíz. Rev. Mex. Cienc. Agríc. 1(2):119-131.
- Cruz, B. G. M. and Sotelo, R. E. D. 2013. Coupling spatial multiattribute analysis and optimization to identify reforestation priority areas. Mountain Res. Develop. 33(1):29-39.
- Eastman, R. R. 2001. Idrisi. Versión I32.2. Manual del usuario. Clark Labs, The Idrisi Project. Clark University. EUA. 960 p.
- Edwards, W. and Barron, F. H. 1994. SMART and SMARTER: Improved simple methods for multiattribute utility measurement. Organizational Behavior and Human Decision Processes. 60:306-325.

In this research, the surface of very good potential obtained is 471 902 ha. As can be seen, differences exist with respect to the surface of good productivity and well suited with respect to this investigation; the surface obtained in this research is increased by 30 722 hectares with respect to the study Sotelo *et al.* (2012) those with the nearest surface. The results of this research are high and accurate; so they match what mentioned Malczewski (1999) and Malczewski (2006) who mentions that modeling with geographic information and multi-criteria methodology produces very accurate and reliable results, which are a tool for decision making in the planning and crop zoning.

Different methodologies for the identification and delineation of potential areas for maize depend on the available information and detail thereof; modeling of information is facilitated by the use of geographic information systems. Finally, we can say that this methodology is a good alternative to know the areas with the best conditions of soil, climate and topography for the development and production of rainfed maize in the State of Mexico; the results obtained with this methodology, outperform all submitted by other researchers and methodologies.

Conclusions

The multi-criteria analysis methodology assigns numerical values to the variables used and their adaptation intervals, which are laminated to the definition and delimitation of potential areas, which is more accurate.

Multicriteria methodology generated and used in this research to define potential areas for rainfed maize determined an area of 1 214 024 ha for the categories of very good, good and medium, which have high yields and double the planted area for maize the State of Mexico.

The greatest potential area is concentrated in areas with the best weather conditions (temperature and precipitation), soil types and height are variables with more weight in defining areas adaptation of maize to the present methodology.

The variables that have the greatest weight in the adaptation of maize, for the State of Mexico, are temperature, altitude, rainfall and soil type.

End of the English version



- Espelta, J. M.; Retana, J. and Habrouk, A. 2003. An economic and ecological multi-criteria evaluation of reforestation methods to recover burned *Pinus nigra* forests in NE Spain. *Forest Ecology and Management*. 180:185-198.
- ESRI. 1992. Arcinfo. Manual del usuario. New York, USA. 359 p.
- ESRI. 2010. ArcGis 9.3. Manual del usuario. New York, USA. 985 p.
- FAO. 1978. Agroecological zones project Vol. I. Methodology and results for Africa. Rome, Italy. 251 p.
- FAO. 1981. Informe de proyecto de zonas agroecológicas. Vol. 3 Metodología y Resultados para América del Sur y Central. Boletín 48. Roma, Italia. 253 p.
- FAO. 1985. Directivas: evaluación de tierras para la agricultura de secano. Boletín de suelos Núm. 52. Roma, Italia. 228 p.
- FAO. 1997. Zonificación agro-ecológica. Guía general. Boletín de suelos Núm. 73. Roma, Italia. 83 p.
- FAO. 2011. El estado mundial de la agricultura y la alimentación. Roma Italia. 197 p.
- FAO. 2013. Ecocrop. Rome, Italy. (<http://ecocrop.fao.org/ecocrop/srv/en/home>).
- García, L. 2004a. Aplicación del análisis multicriterio en la evaluación de impactos ambientales. Universidad Politécnica de Cataluña Programa de Doctorado de Ingeniería Ambiental. Barcelona, España. 68-78 pp.
- García, E. 2004b. Modificaciones al sistema climático de Köppen para la República Mexicana. Instituto de Geografía. UNAM. Serie de libros Núm. 6. 5ª (Ed.). México, D. F. 292 p.
- Geneletti, D. 2004. A GIS-based decision support system to identify nature conservation priorities in an alpine valley. *Land Use Policy*. 21:149-160.
- Geneletti, D. 2007. Expert panel-based assessment of forest landscapes for land use planning. *Mountain Res. Develop.* 27:220-223.
- Gkaraveli, A.; Good, J. E. G. and Williams, J. H. 2004. Determining priority areas for native woodland expansion and restoration in Snowdonia National Park, Wales. *Biological Conservation*. 115(3):395-402.
- Goodwin, P. and Wright, G. 2014. Decision analysis for management judgment. 5th (Ed.). John Wiley & Sons, Chichester. New York, USA. 454 p.
- Gutiérrez, L.; Franco, J.; Crossa, J. and Abadie, T. 2003. Comparing a preliminary racial classification with a numerical classification of the Maize Landraces of Uruguay. *Crop Sci.* 43:718-727.
- Hack-ten, B. D. J. M.; Van Lanen, J. A. H. and Bouma, J. 1993. The leaching potential as a land quality of two Dutch soils under current and potential management conditions. *Geoderma*. 60(1-4):73-88.
- IIASA/FAO. 2012. Global agro-ecological zones (GAEZ v3.0). IIASA and FAO. Rome, Italy. 360 p.
- INIFAP. 1995. Determinación del potencial productivo de especies vegetales en el Estado de México. Zinacantepec, Estado de México. 37 p.
- INEGI. 1988. Atlas Nacional del medio físico. Primera reimpresión. Secretaría de Programación y Presupuesto. México, D. F. 543 p.
- INEGI. 2006. Estadísticas básicas del Estado de México. Síntesis Geográfica del Estado de México. <http://www.inegi.gob.mx>.
- INEGI. 2012. Sistema de descarga del continuo de elevaciones mexicano <http://www.inegi.gob.mx/inegi/default.aspx>.
- IUSS Working Group WRB. 2006. World reference base for soil resources. A framework for international classification, correlation and communication. 2nd (Ed.). World Soil Resources Reports No. 103. Rome, Italy. 117 p.
- Jankowski, P. 1995. Integrating geographical information systems and multiple criteria decision making methods. *International Journal of Geographical Information Systems*. 9(3):251-273.
- Jordan, R. N. 2008. Agroecology in action- extending alternative agriculture through social networks. *Crop Sci.* 48(4):1642-1643.
- Kangas, J. and Kangas, A. 2005. Multiple criteria decision support in forest management- the approach, methods applied, and experiences gained. *Forest Ecology and Management*. 207:133-143.
- Kiker, G. A.; Bridges, T. S.; Varghese, A.; Seager, T. P. and Linkov, I. 2005. Application of multicriteria decision analysis in environmental decision making. *Integrated Environmental Assessment and Management*. 1:95-108.
- Löffler, M. C.; Wei J.; Fast T.; Gogerty, J.; Langton, S.; Bergman, M.; Merrill, B. and Cooper, M. 2005. Classification of maize environments using crop simulation and geographic information systems. *Crop Sci.* 45(5):1708-1716.
- Malczewski, J. 1999. GIS and multicriteria decision analysis. John Wiley and Sons. 2th (Ed.). New York, USA. 393 p.
- Malczewski, J. 2006. GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science*. Vol. 20(7)703-726.
- María, R. A. 2008. El proceso de análisis jerárquico con base en funciones de producción para planear la siembra de maíz de temporal. Tesis de Doctor en Ciencias. Colegio de Posgraduados en Ciencias Agrícolas. Centro de Edafología. Montecillo, Texcoco, Estado de México. 223 p.
- Márquez, R. F. 1990. Zonificación agroecológica del maíz (*Zea mays*) de temporal en el Estado de México. Tesis de Licenciatura. Departamento de Suelos. Universidad Autónoma Chapingo (UACH). Chapingo, Estado de México. 95 p.
- Medina, G. G.; Ruiz, A. C.; Martínez, R. P. y Ortiz, M. V. 1997. Metodología para la determinación del potencial productivo de especies vegetales. *Agric. Téc. Méx.* 23(1):69-89.
- Nadal, A. y Wise, T. 2005. Los costos ambientales de la liberalización agrícola: el comercio del maíz entre México y EU, en el marco del NAFTA. <http://ase.tufts.edu/gdae/Pubs/rp/wg/NadalyWise.pdf>.
- Ortiz, S. C. A. 1986. Evaluación de la aptitud de las tierras de México para la producción de maíz, frijol y sorgo bajo condiciones de temporal. Serie Cuadernos de Edafología Número 8. Colegio de Posgraduados. Chapingo, Estado de México. 39 p.
- Osorio, G. N.; López, S. H.; Gil, M. A.; Ramírez, V. B.; Gutiérrez, R. N.; Crespo, P. G. y Montero, P. A. 2012. Utilización, oferta y demanda de tecnología para producción de Maíz en el valle de Puebla, México. *Agric. Soc. Des.* 9(1):55-69.
- Paredes, L. O.; Guevara, F. L. y Bello, L. A. P. 2009. La nixtamalización y el valor nutritivo del maíz. *Ciencias*. 92-93:60-70.
- Parra, U. J. G. 1989. Zonificación agroecológica para la producción de caña de azúcar en algunos estados de México. Tesis de Maestría. Centro de Edafología. Colegio de Posgraduados. Montecillo, Estado de México. 176 p.
- Partovi, F. and Hopton, W. 1994. The analytic hierarchy process as applied to two types of inventory problems. *Production and Inventory Management Journal First Quarter 1994*. ProQuest Science Journals. Drexel University. Philadelphia. USA. 35 p.
- Perales, R. H. R. 2009. Maíz riqueza de México. *Ciencias*. 92-93:46-55.
- Romero, C. 1993. Teoría de la decisión multicriterio: conceptos, técnicas y aplicaciones. Alianza Editorial S. A., Madrid, España. 196 p.

- Romero, J. y Puyana, A. 2004. Evaluación integral de los impactos e instrumentación del capítulo agropecuario del TLCAN. Documento Maestro. México, D. F. 54 p.
- Rothley, K. D. 1999. Designing bioserve networks to satisfy multiple conflicting demands. *Ecological Applications*. 9:741-750.
- Ruiz, C. J. A.; Durán, P. N.; Sánchez, G. J. J.; Ron, P. J.; González, E. D. R.; Holland, J. B. and Medina, G. G. 2008. Climatic adaptation and ecological descriptors of 42 Mexican Maize races. *Crop Sci.* 48(4):1502-1512.
- Sánchez, R. 2010. El Análisis multicriterio en la práctica deseamos contribuir a cerrar la brecha entre la teoría y la práctica del análisis multicriterio. <http://analismulticriterio.blogspot.com/>.
- SIAP. 2013. Producción agrícola por estados. <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-estado/>.
- Shahbazi, F. and Jafarzadeh A. A. 2010. Integrated assessment of rural lands for sustainable development using MicroLEIS DSS in West Azerbaijan, Iran. *Geoderma*. 157(3-4):175-184.
- Sotelo, R. E. D.; González, A. H.; Cruz, G. B.; Moreno, F. S. S. y Ochoa, E. 2010. La clasificación FAO-WRB y los suelos del Estado de México. Libro técnico Núm. 14. INIFAP. Zinacantepec, Estado de México. 159 p.
- Sotelo, R. E. D.; González, A. H.; Cruz, G. B.; Martínez, A. A. M. y Flores, R. L. 2012. Determinación del potencial productivo en cultivos prioritarios en el Estado de México. Libro técnico Núm. 51. INIFAP. Zinacantepec, Estado de México. 258 p.
- Stewart, T. J. and Joubert, A. 2007. Conflicts between conservation goals and land use for exotic plantations in South Africa. *In: multicriteria analysis for land-use management*. Beinat, E. and Nijkamp, P. (eds). Kluwer Academic. Dordrecht, Países Bajos. 36-62 pp.
- Stuart, D. and Emerson, B. 2009. Agricultural systems: agroecology and rural innovation for development. *J. Environ. Qual.* 38:373-374.
- Trueba, C. A. 2012. Semillas mexicanas mejoradas de maíz: Su potencial productivo. Colegio de Posgraduados. Montecillo, Estado de México. 132 p.
- Turrent, F. A. 1986. Estimación del potencial productivo actual de maíz y frijol en la República Mexicana. Colegio de Postgraduados. Chapingo, Estado de México. 165 p.
- Turrent, F. A.; Leyva, R. S.; Espinoza, A. C.; Garza, R. G.; Moreno, R. D. y Aveldaño, R. S. 1992. Manual de diagnóstico recomendación para el cultivo de maíz en el Estado de México. Provincias agronómicas de riego, de muy buena y de buena productividad. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias. Centro de Investigaciones Región Centro. Campo Experimental Valle de México. Chapingo, Estado de México. 257 p.
- Turrent, F. A. 2009. El potencial productivo del maíz. *Ciencias*. 92-93:126-129.
- Valente, R. O. A. and Vettorazzi, C. A. 2008. Definition of priority areas for forest conservation through the ordered weighted averaging method. *Forest Ecology and Management*. 256:1408-1417.
- Valerie, B. and Steward, J. T. 2002. Multiple criteria decision analysis: an integrated approach. Kluwer Academic Publisher. United Kingdom. 125 p.
- Van-Diepen, C. A. 1993. Two alternative methods for evaluating regional crop yield potential in the European Community. *Geoderma*. 60(1-4):359-376.
- UCCS. 2009. Ciencia y compromiso social. *Ciencias*. 92-93:142-145.