

# APTITUD DE TERRENOS PARA PLANTACIONES DE EUCALIPTO (*Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden): DEFINICIÓN MEDIANTE EL PROCESO DE ANÁLISIS JERARQUIZADO Y SIG

## LAND SUITABILITY FOR EUCALYPTUS (*Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden) PLANTATIONS: DEFINITION THROUGH THE ANALYTIC HIERARCHY PROCESS AND GIS

J. Antonio Bustillos-Herrera<sup>1</sup>, J. René Valdez-Lazalde<sup>1</sup>, Arnulfo Aldrete<sup>1</sup>, Manuel de J. González-Guillén<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Forestal. Campus Montecillo. Colegio de Postgraduados. 56230. Montecillo, Estado de México.  
(jabustillos@colpos.mx) (valdez@colpos.mx)

### RESUMEN

Evaluar el grado de aptitud del suelo permite identificar la capacidad inherente de una unidad de tierra para apoyar su uso más apropiado. En este estudio se implementó el Proceso de Análisis Jerarquizado (PAJ) combinado con funciones de membresía (lógica borrosa) en un entorno de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para definir áreas con aptitud para establecer *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden en ocho municipios localizados en la parte centro-sur del Estado de Sinaloa, México. Se utilizó información cartográfica de clima, suelo y topografía, además de la opinión de plantadores expertos, para evaluar el grado de aptitud de la tierra. Según los resultados, en la región de estudio hay aproximadamente 38 863, 121 932 y 302 551 ha con aptitud alta, media y baja. La técnica de análisis multicriterio PAJ fue útil para incorporar el conocimiento experto de plantadores forestales en el proceso de toma de decisiones, así como para la localización espacial y cuantificación de superficies con diferente grado de aptitud para el establecimiento de plantaciones forestales de eucalipto.

**Palabras clave:** *Eucalyptus grandis*, análisis espacial, lógica borrosa, modelación cartográfica, toma de decisiones.

### INTRODUCCIÓN

El mercado nacional e internacional exige cada vez más cantidad y calidad de productos forestales primarios. De ahí la necesidad de complementar el esquema actual de aprovechamiento de bosques naturales con plantaciones forestales comerciales manejadas con criterios sostenibles. Esta forma de producción permitiría abastecer de materias primas provenientes de terrenos con mayor aptitud a la industria forestal, disminuyendo la presión actual por el uso y aprovechamiento de los bosques naturales que decrecen y se deterioran.

El uso de los suelos forestales difiere de los usos agrícolas y pecuarios. Una diferencia es el periodo de

### ABSTRACT

Evaluating the degree of land suitability makes it possible to identify the inherent capacity of a land unit to support its most appropriate use. In the present study, the Analytic Hierarchy Process (AHP) was implemented, combined with membership functions (fuzzy logic) in the context of Geographic Information Systems (GIS) to define areas with suitability for establishing *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden in eight municipalities located in the south-central part of the State of Sinaloa, México. Cartographic information of climate, soil and topography was used, along with the opinion of expert planters, to evaluate the degree of land suitability. According to the results, in the region of study there are approximately 38 863, 121 932 and 302 551 ha with high, medium and low suitability. The multi-criteria analysis technique AHP was useful for incorporating the expert knowledge of forest planters in the decision making process, and in spatial localization and quantification of surfaces with different degrees of suitability for the establishment of eucalyptus forest plantations.

**Key words:** *Eucalyptus grandis*, spatial analysis, fuzzy logic, cartographic modeling, decision making.

### INTRODUCTION

The national and international market demands an increasingly higher amount and quality of primary forest products. Thus, there is a need to complement the present system of the use of natural forests with commercial forest plantations managed with sustainable criteria. This form of production would supply the forest industry with prime materials from land with greater suitability, reducing the present pressure due to the use and exploitation of the ever decreasing and deteriorating natural forests.

The use of forest soils differs from agricultural and livestock use. One difference is the period of time between the establishment of the forest mass and its harvest, which is more than six years, and sometimes as many as 100 years. This means that the decisions in

Recibido: Junio, 2006. Aprobado: Junio, 2007.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 41: 787-796. 2007.

tiempo entre el establecimiento de la masa forestal y su cosecha, la cual es mayor a seis años y, algunas veces, hasta de 100. Ésto significa que las decisiones en el manejo forestal son difíciles de cambiar, y que la producción forestal sostenida debe tomar en cuenta el largo plazo (FAO, 1985). Por tanto, la definición de la aptitud de la tierra para uso forestal debe realizarse con el mayor cuidado posible para minimizar el riesgo de tomar decisiones equivocadas.

El objetivo de la estimación de la aptitud de la tierra es identificar la capacidad inherente de una unidad de tierra para apoyar el uso más apropiado del suelo basado en requerimientos específicos (suelo, precipitación, temperatura, otros) y de las preferencias del tomador de decisiones. Realizar estas evaluaciones para superficies grandes era complicado debido a la enorme cantidad de datos espaciales y de atributos que se debe analizar (Collins *et al.*, 2001). Pero, el desarrollo en la teoría de decisiones, el análisis espacial y la computación facilita el uso de algoritmos y métodos que procesan datos e información espacial y no espacial, logrando incorporar y analizar información del ambiente y la experiencia de personas en el proceso de evaluación. Esto con el supuesto de que la experiencia o juicio de los tomadores de decisiones algunas veces es más importante que la información biofísica del fenómeno (Saaty, 1980).

El objetivo del presente estudio fue explorar y presentar la aplicación conjunta del Proceso de Análisis Jerarquizado (PAJ) y modelos de membresía (lógica borrosa) en un entorno de SIG (mediante un análisis multicriterio espacial) para localizar y cuantificar espacialmente los terrenos con aptitud ecológica al establecer plantaciones forestales de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, en ocho municipios del centro-sur del Estado de Sinaloa, México.

A diferencia de otros estudios en el área forestal (Meza, 2002; Reygadas *et al.*, 2000; Moreno y Moreno, 1995) y agrícola (Ceballos-Silva y López-Blanco, 2003), el presente estudio supera las limitaciones del análisis booleano tradicional al considerar de manera explícita la opinión y ponderación de los criterios usados por los tomadores de decisiones en la selección de alternativas. Se considera que el enfoque implementado es novedoso en el área forestal para definir el grado de aptitud de terrenos para especies de interés; aunque se puede usar para especies agrícolas (Prakash, 2003).

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

La investigación se desarrolló en el centro-sur del Estado de Sinaloa, en los municipios de Culiacán, Cosalá, Elota, San Ignacio,

forest management are difficult to change, and that sustained forest production should consider the long term (FAO, 1985). Therefore, the definition of land suitability for forest use should be made with the greatest possible care to minimize the risk of making erroneous decisions.

The objective of estimating land suitability is to identify the inherent capacity of a land unit to support the most appropriate use of the soil based on specific requirements (soil, precipitation, temperature, and other factors) and of the preferences of the decision maker. Making these evaluations for large surfaces used to be complicated due to the enormous amount of spatial data and attributes to be analyzed (Collins *et al.*, 2001). However, the development in decision theory, spatial analysis and computation facilitates the use of algorithms and methods that process data and spatial and non-spatial information, thus making it possible to incorporate and analyze information of the environment and the experience of people in the evaluation process. The above contemplates the assumption that the experience or judgment of the decision makers is sometimes more important than the biophysical information of the phenomenon (Saaty, 1980).

The objective of the present study was to explore and present the joint application of the Analytic Hierarchy Process (AHP) and membership models (fuzzy logic) in the context of GIS (by means of a multi-criteria spatial analysis) to localize and spatially quantify the ecologically suitable land for establishing forest plantations of *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, in eight municipalities of the south-central region of the State of Sinaloa, México.

Contrary to other studies in the area of forestry (Meza, 2002; Reygadas *et al.*, 2000; Moreno and Moreno, 1995) and agriculture (Ceballos-Silva and López-Blanco, 2003), the present study goes beyond the limitations of traditional Boolean analysis by explicitly considering the opinion and weighting of the criteria used by the decision makers in the selection of alternatives. It is considered that the focus that is implemented is innovative in the area of forestry for defining the degree of land suitability for species of interest; although it can also be used for agricultural species (Prakash, 2003).

## MATERIALS AND METHODS

### Area of study

The investigation was carried out in the south-central region of the State of Sinaloa, in the municipalities of Culiacán, Cosalá, Elota, San Ignacio, Mazatlán, Concordia, Rosario and Escuinapa (Figure 1), between the coordinates 22° 28' 00'' and 25° 14' 56''N and between 105° 22' 16'' and 107° 50' 15'' W.

Mazatlán, Concordia, Rosario y Escuinapa (Figura 1), entre las coordenadas 22° 28' 00" y 25° 14' 56" N y entre 105° 22' 16" y 107° 50' 15" O.

#### Base de datos cartográfica

Se usaron mapas digitales de precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima; textura y profundidad del suelo elaborados a escala 1:1 000 000 de la CONABIO (2005); además del mapa de pH escala 1:250,000 (SEMARNAT y CP, 2002). También se usó un recorte del modelo de elevación digital (INEGI, 2005) con una resolución espacial de 30 m.

La totalidad de la cartografía se rasterizó a un tamaño de píxel de 30 m y se homogeneizó a la proyección Universal Transversa de Mercator (UTM), Datum Norteamericano de 1983 (NAD 83), Zona 13 Norte, para hacer posible el modelado cartográfico.

#### Generalidades y requerimientos ambientales de la especie

*E. grandis* Hill ex Maiden (eucalipto rosado) es nativo de la costa oriental de Australia. Por la superficie plantada y sus rendimientos, se considera una de las especies exóticas más importantes en el mundo. Puede crecer de 2 a 3 m anuales en altura en los primeros 10 años, formando un tronco recto que se desrama naturalmente. Su madera es aceptable para diversos usos como la chapa, madera aserrada, empaque, pulpa y papel (Meskimen y Francis, 1990; FAO, 1981).

El acopio de información confiable de los requerimientos climáticos, edáficos y fisiográficos de la especie es importante para definir la aptitud de un terreno para plantar una especie de interés (i.e., *E. grandis*). Algunos requerimientos (criterios y subcriterios) para *E. grandis* se describen en el Cuadro 1 (García *et al.*, 2000; Valdez-Lazalde *et al.*, 2003).

#### Proceso de Análisis Jerarquizado (PAJ)-Lógica borrosa

La toma de decisiones multicriterio, el PAJ en particular, es un conjunto de conceptos, modelos y métodos para auxiliar a los



Figura 1. Localización del área de estudio.  
Figure 1. Location of the area of study.

#### Cartographic data base

Digital maps were used of precipitation, maximum temperature, minimum temperature, soil texture and depth made to a scale of 1:1 000 000 of the CONABIO (2005); as well as the map of pH scale 1:250,000 (SEMARNAT and CP, 2002). A subset was also used of the digital elevation model (INEGI, 2005) with a spatial resolution of 30 m.

The totality of the cartography was rasterized to a pixel size of 30 m and was homogenized to the Universal Transverse Mercator (UTM) projection, North American Datum of 1983 (NAD 83), Zone 13 North, to enable the cartographic modeling.

#### Generalities and environmental requirements of the species

*E. grandis* Hill ex Maiden (pink eucalyptus) is native to the east coast of Australia. Given the planted surface and its yields, it is considered one of the most important exotic species in the world. It can grow 2 to 3 m a year in height in the first 10 years, forming a straight trunk that prunes itself naturally. Its wood is acceptable for diverse used such as veneer, sawed wood, packing, pulp and paper (Meskimen and Francis, 1990; FAO, 1981).

The gathering of reliable information of the climatic, edaphic and physiographic requirements of the species is important to define the suitability of a piece of land to plant a species of interest (i.e., *E. grandis*). Some requirements (criteria and sub-criteria) for *E. grandis* are described in Table 1 (García *et al.*, 2000; Valdez-Lazalde *et al.*, 2003).

#### Analytic Hierarchy Process (AHP)-Fuzzy logic

Multi-criteria decision making, the AHP in particular, is a group of concepts, models and methods to aid decision makers in describing, ordering, hierarchizing, evaluating, selecting or rejecting alternatives based on an evaluation (expressed by punctuations, values or intensities of preference) according to various criteria (Barredo, 1996). Given that not all criteria have the same importance, and that each one of them contributes in a differential way to the suitability or decision in diverse degrees, they should be well defined, grouped and organized in various hierarchies (Saaty, 1980).

The AHP (Analytic Hierarchy Process) was designed to emulate the manner in which people face situations of complex decisions: 1) an innate ability of humans to make clearly defined judgments on small problems; 2) in the decision making process, people's experience and knowledge is at least as valuable as the data that is used (Saaty, 1980). The AHP takes apart a complex and non-structured situation by its components and orders them into a hierarchy. Once the problem is taken apart or hierarchized, paired comparison (pair to pair) techniques are used within each hierarchy with the purpose of allowing decision makers to make simple judgments in each level of the hierarchy. Then global priorities are calculated for each decision alternative through the aggregation of the results within each hierarchy. The mathematical bases and details for the application of the procedure are described in Saaty (1980).

tomadores de decisiones a describir, ordenar, jerarquizar, evaluar, seleccionar o rechazar alternativas con base en una evaluación (expresada por puntuaciones, valores o intensidades de preferencia) de acuerdo a varios criterios (Barredo, 1996). Dado que no todos los criterios son igualmente importantes, y que cada uno contribuye de manera diferenciada hacia la aptitud o decisión en diversos grados, éstos deben ser bien definidos, agrupados y organizados en varias jerarquías (Saaty, 1980).

El PAJ (AHP —Analytic Hierarchy Process) fue diseñado para emular la manera en que las personas afrontan situaciones de decisiones complejas. Tiene dos supuestos fundamentales: 1) una habilidad innata de los seres humanos para emitir juicios claramente definidos sobre problemas pequeños; 2) en el proceso de toma de decisiones la experiencia y el conocimiento de la gente es por lo menos tan valiosa como los datos usados (Saaty, 1980). El PAJ desintegra una situación compleja y no estructurada en sus componentes y los ordena en una jerarquía. Una vez descompuesto o jerarquizado el problema, se utilizan técnicas de comparación pareada (par a par) dentro de cada jerarquía con la finalidad de permitir a los tomadores de decisión realizar juicios simples en cada nivel de la jerarquía. Luego se calculan las prioridades globales para cada alternativa de decisión mediante la agregación de los resultados dentro de cada jerarquía. Los fundamentos matemáticos y detalles para la aplicación del procedimiento se describen en Saaty (1980).

### Etapas del PAJ

El PAJ conduce el proceso de toma de decisiones en dos etapas principales:

1. Estructuración de la jerarquía. El problema se descompone en una jerarquía que contiene los elementos básicos que intervienen en él.
2. Evaluación, la cual incluye:
  - Determinación de las preferencias o ponderación de los elementos de la jerarquía a través del uso de comparaciones por pares.
  - Síntesis de las prioridades relativas para determinar el resultado global.

Las preferencias o pesos definidos por los tomadores de decisión para cada elemento de la jerarquía se convierten en valores cuantitativos usando la escala fundamental (1 al 9) diseñada por Saaty (1980). Ésta es una escala de numeración absoluta usada para asignar valores numéricos a juicios realizados mediante la comparación de dos elementos. El conjunto de todos los juicios se representan en una matriz de comparación por pares en la cual el conjunto de elementos se compara consigo mismo.

### Estructuración de la jerarquía

Al construir la jerarquía se debe considerar el ambiente que afecta el problema e identificar los aspectos o criterios que mejor describen la solución, los factores asociados con el problema, las posibles alternativas de solución y todo aquel factor relevante que

### Stages of the AHP

The AHP leads the decision making process in two principal stages:

1. Structuring of the hierarchy. The problem is broken down into a hierarchy that contains the basic elements that intervene in it.
2. Evaluation, which includes:
  - Determination of the preferences or weighting of the elements of the hierarchy through the use of paired comparisons.
  - Synthesis of the relative priorities to determine the global result.

The preferences or weights defined by the decision makers for each element of the hierarchy are converted into quantitative values using the fundamental scale (1 to 9) designed by Saaty (1980). This is a scale of absolute numeration used to assign numerical values to judgments made by the comparison of two elements. The group of all of the judgments is represented in a matrix of comparison by pairs in which the group of elements is compared with itself.

### Structuring of the hierarchy

When structuring the hierarchy, the environment affecting the problem should be considered, and the aspects or criteria that best describe the solution should be identified, along with the factors associated with the problem, the possible alternatives of solution and any relative factor that intervenes in the problem. The structuring of a hierarchy depends on the vision held of the system, the amount of information relative to the problem and the answers to be obtained with the solution. The hierarchy makes it possible to have a global vision of the complex relationships in the system and helps the decision maker to determine whether the aspects obtained in each level are of

**Cuadro 1. Requerimientos ambientales de *E. grandis*.  
Table 1. Environmental requirements of *E. grandis*.**

Criterio	Subcriterio	Intervalo	
		Mínima	Máxima
Clima	Precipitación	1020	1780 mm
	Temperatura mínima promedio	2	10 °C
	Temperatura máxima promedio		30 °C
Factores edáficos	pH	Ácido	
	Profundidad del suelo Textura	40 cm	Limosa, franca o ligeramente arcillosa
Aspectos fisiográficos	Altitud	0	600 m
	Pendiente	0	30%

intervenga en el problema. La estructuración de una jerarquía depende de la visión que se tenga del sistema, de la cantidad de información relativa al problema y de las respuestas a obtener con la solución. La jerarquía permite tener una visión global de las relaciones complejas en el sistema y ayuda al tomador de decisiones a determinar si los aspectos obtenidos en cada nivel son del mismo orden de magnitud, es decir, si son comparables. En la Figura 2 se muestra la jerarquización realizada para implementar la metodología PAJ para identificar la aptitud de las áreas para plantar *E. grandis*.

**Evaluación**

El proceso de la evaluación se muestra en la Figura 3. Se inició a partir de los mapas de subcriterios identificados como importantes (precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima, pH, profundidad y textura del suelo, altitud y pendiente). Éstos fueron estandarizados mediante funciones de membresía y ponderados en función del peso o importancia calculado con datos obtenidos de plantadores expertos mediante la aplicación directa de encuestas (detalles de su aplicación se proporcionan en el apartado Ponderación de los criterios y subcriterios). Los subcriterios fueron adicionados dentro de cada uno de los criterios (clima, suelo y topografía), y luego fueron agregados y ponderados para obtener un mapa de valores continuos de aptitud. En la última fase se discriminaron del mapa de aptitud final las áreas con baja o nula posibilidad de cambio de uso por razones legales (áreas forestales arboladas), uso permanente definido (urbano, carreteras, cuerpos de agua), mayor rentabilidad (agricultura intensiva), otros. Finalmente, el mapa fue clasificado en categorías de aptitud para facilitar su uso.

**Estandarización de los subcriterios mediante funciones de membresía (lógica borrosa)**

Dado que los subcriterios identificados se miden en unidades dimensionales distintas, fue necesario estandarizarlos (transformarlos)

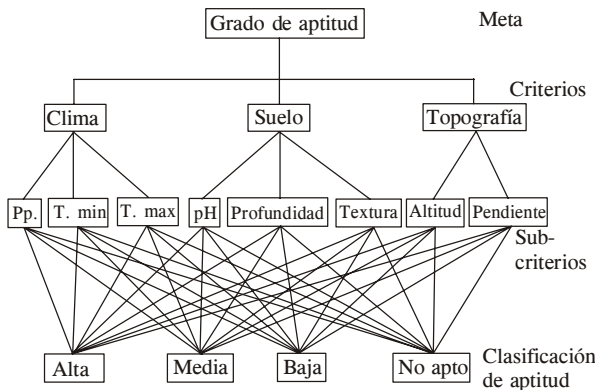


Figura 2. Organización jerárquica de la meta, criterios y subcriterios considerados para definir áreas aptas para plantar *E. grandis* en el área de estudio.

Figure 2. Hierarchic organization of the goal, criteria and sub-criteria considered for defining areas suitable for planting *E. grandis* in the area of study.

the same order of magnitude, that is, if they are comparable. The hierarchization made to implement the AHP methodology to identify the suitability of the areas for planting *E. grandis*, is shown in Figure 2.

**Evaluation**

The evaluation process is shown in Figure 3. It initiated from the maps of sub-criteria identified as important (precipitation, maximum temperature, minimum temperature, pH, soil depth and texture, altitude and slope). These were standardized through membership functions and weighted as a function of the weight or importance calculated with data obtained from expert planters through the direct application of surveys (details of their application are proposed in the section Weighting of the criteria and sub-criteria). The sub-criteria were added within each one of the criteria (climate, soil and topography), and then were added and weighted to obtain a map of continuous values of suitability. In the final phase the areas with low or null possibility of exchange for legal reasons (treed forest areas), defined permanent use (urban, highways, bodies of water), greater profitability (intensive agriculture) and others, were discriminated from the final suitability map. Finally, the map was classified into categories of suitability to facilitate its use.

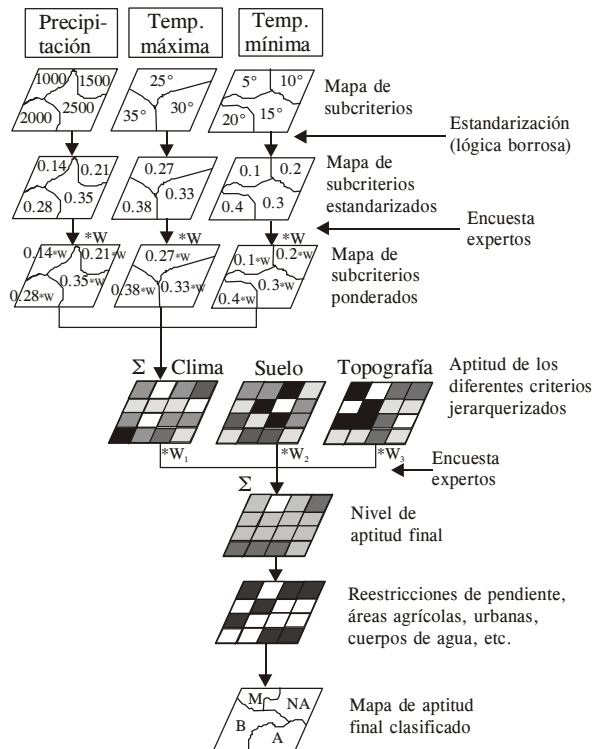


Figura 3. Secuencia de agregación de clases y pesos (ponderaciones) sobre las jerarquías definidas en la aplicación del PAJ para definir áreas para plantar *E. grandis*.

Figure 3. Aggregation sequence of classes and weights (weightings) over the hierarchies defined in the application of the AHP to define areas for planting *E. grandis*.

a una unidad común (valores de 0 a 1) para su análisis. Para esto se utilizaron funciones de membresía definidas mediante el método de lógica borrosa (Ghribi, 2005; Burrough y McDonnel, 1998). Estas funciones permiten definir el grado de pertenencia de cada píxel de un mapa a un determinado conjunto o fenómeno; en este caso, para definir el grado o conveniencia de que cierta característica del ambiente (subcriterio) sea adecuada (apta) para el establecimiento de *E. grandis*. Por su forma, existen tres tipos básicos de funciones de membresía: lineal, en forma de J, y sigmoideal; todas se usan para representar la pertenencia de cada píxel en una escala de baja (0) a alta (1) (Burrough y McDonnel, 1998). Las funciones pueden ser crecientes, decrecientes o simétricas. La definición específica para cada subcriterio se realizó con base en los requerimientos de la especie mediante la designación de puntos de control en la función, que limitan la pertenencia de los píxeles. En la Figura 4 se muestran las funciones de membresía, con sus respectivos puntos de control, definidas en el módulo FUZZY de IDRISI Kilimanjaro™ para estandarizar los subcriterios (Eastman, 2003).

#### Ponderación de los criterios y subcriterios

Después de diseñar y validar una encuesta con dos expertos plantadores forestales, ésta se aplicó de manera directa a 11 expertos en el establecimiento de plantaciones forestales, todos ellos conferencistas invitados a la VII Reunión Nacional de Plantaciones Forestales (en Morelia, Michoacán, en noviembre de 2005), con la finalidad de ponderar la importancia de los criterios y subcriterios utilizados. Cada entrevistado completó cuatro matrices de comparación pareada diseñadas *ex profeso* según Saaty (1980). Una sirvió para ponderar los criterios considerados (clima, suelo, topografía); las tres restantes se usaron para ponderar los subcriterios que conforman cada criterio (Figura 2). Tres matrices fueron de dimensión 3×3 (hileras y columnas); sólo la matriz para ponderar topografía fue 2×2. Los datos obtenidos mediante las encuestas (matrices de comparación pareada) se procesaron en el programa IDRISI Kilimanjaro, con el módulo GIS Analysis/Decision Support/Weight (Eastman, 2003).

Existe el riesgo de que el peso asignado por los expertos a cada criterio o subcriterio resulte inadecuado como resultado de comparaciones pareadas erróneas o incongruentes. Para eliminar tal riesgo, la metodología incluye el cálculo de un índice de consistencia (IC) que mide la solidez de las comparaciones (Malczewski, 1999; Saaty, 1980); un valor de IC menor de 0.10 se considera adecuado. Consecuentemente, una vez obtenidos los resultados, se eliminaron las ponderaciones con una consistencia inadecuada ( $IC > 0.10$ ), obteniéndose el promedio de las ponderaciones consistentes (cuatro). Lo anterior dio el peso para cada criterio y subcriterio (Cuadro 2).

Los mapas de subcriterios estandarizados se multiplicaron por los pesos derivados del análisis de las encuestas (Cuadro 2), dando como resultado los mapas de subcriterios ponderados. Estos mapas se adicionaron para obtener un mapa de aptitud del terreno cuando se considera un criterio único (v. g. clima, en la Figura 3). El procedimiento se repitió de manera similar con los subcriterios que componen los criterios suelo y topografía. Los tres criterios

#### Standardization of the sub-criteria through membership functions (fuzzy logic)

Given that the identified sub-criteria are measured in different dimensional units, it was necessary to standardize (transform) them to a common unit (values of 0 to 1) for their analysis. For this purpose, membership functions were used defined through the fuzzy logic method (Ghribi, 2005; Burrough and McDonnel, 1998). These functions make it possible to define the degree of membership of each pixel of a map to a determined group or phenomenon; in this case, to define the degree or convenience of which a certain characteristic of the environment (sub-criteria) is suitable (apt) for the establishment of *E. grandis*. By their form, there are three basic types of membership functions: linear, J form, and sigmoidal; all are used to represent the membership of each pixel on a scale of low (0) to high (1) (Burrough and McDonnel, 1998). The functions can be increasing, decreasing or symmetrical. The specific definition for each sub-criterion was made based on the requirements of the species through the designation of control points in the function, which limit the membership of the pixels. The membership functions, with their respective control points, defined in the model FUZZY of IDRISI Kilimanjaro™ for standardizing the sub-criteria (Eastman, 2003) are shown in Figure 4.

#### Weighing of the criteria and sub-criteria

After designing and validating a survey with two expert forest planters, it was applied directly to 11 experts in the establishment of forest plantations, all of whom were conference speakers invited to the VII National Reunion of Forest Plantations (in Morelia, Michoacán, in November of 2005), with the purpose of weighing the importance of the criteria and sub-criteria used. Each interview completed four matrixes of paired comparison designed *ex profeso* according to Saaty (1980). One served to weigh the criteria considered (climate, soil, topography); the other three were used to weigh from the sub-criteria that comprise each criterion (Figure 2). Three matrices were 3×3 (rows and columns); only the matrix for weighing topography was 2×2. The data obtained through the surveys (paired comparison matrices) were processed in the program IDRISI Kilimanjaro, with the module SIG Analysis/Decision/Support/Weight (Eastman, 2003).

There is a risk that the weight assigned by the experts to each criterion or sub-criterion will be inadequate as a result of erroneous or incongruent paired comparisons. To eliminate such a risk, the methodology includes the calculation of a consistency index (CI) that measures the solidity of the comparisons (Malczewski, 1999; Saaty, 1980); a value of CI below 0.10 is considered adequate. Consequently, once the results are obtained, the weightings that showed an inadequate consistency ( $CI > 0.10$ ) were eliminated, and the average of the consistent weightings (four). The above provided the weight for each criterion and sub-criterion (Table 2) was obtained.

The maps of standardized sub-criteria were multiplied by the weights derived from the analysis of the surveys (Table 2), resulting

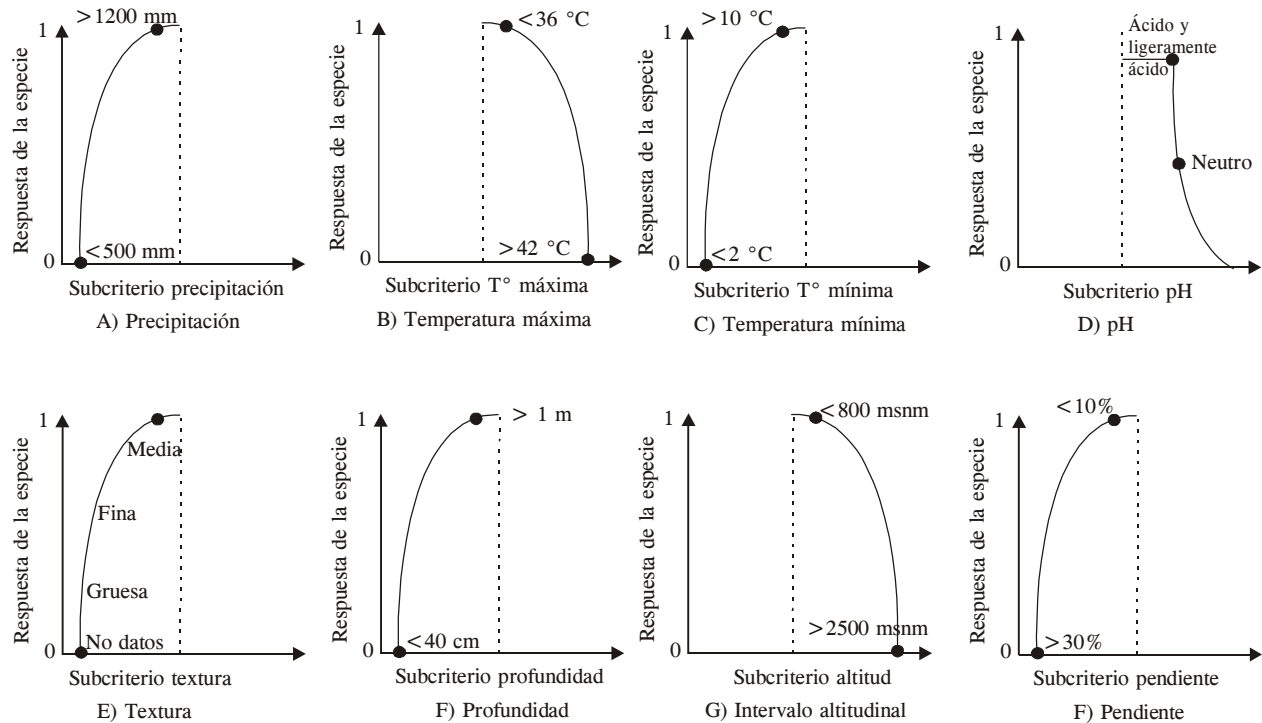


Figura 4. Funciones de membresía utilizadas para la estandarización (mediante lógica borrosa) de los subcriterios asociados a *E. grandis* en el área de estudio.

Figure 4. Membership functions used for the standardization (through fuzzy logic) of the sub-criteria associated with *E. grandis* in the area of study.

considerados se ponderaron (usando los valores derivados de las encuestas a expertos; Cuadro 2) y se agregaron para obtener el mapa de aptitud final. Éste se multiplicó por un mapa binario para eliminar áreas con restricción para el desarrollo de plantaciones (uso urbano, cuerpos de agua, carreteras, pendientes mayores a 30%, vegetación natural). Para facilitar la interpretación de los resultados, el mapa se reclasificó en cuatro clases de aptitud: alta (de 0.9 a 1), media (de 0.8 a 0.9), baja (de 0.7 a 0.8) y marginal o nula (de 0 a 0.7).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Consistentemente, los expertos identificaron el clima como el criterio más importante a considerar (0.539) seguido del suelo (0.355). Dentro del clima identificaron a la cantidad de precipitación como el subcriterio más importante (0.625), seguido de la temperatura mínima (0.204). En relación con el suelo, se identificó a la profundidad como el subcriterio más importante (0.433), seguido del subcriterio pH.

Existen discrepancias entre autores al reportar los requerimientos ambientales de la especie, por lo cual se tomaron como válidos los requerimientos en mayores coincidencias en la literatura. Los expertos analizaron

in the maps of weighted sub-criteria. These maps were added to obtain a map of land suitability when it is considered a single criterion (v. g. climate, in Figure 3). The procedure was repeated in a similar way with the sub-criteria that comprise the soil and topography criteria. The three criteria considered were weighed (using the values derived from the surveys applied to experts; Table 1) and were added to obtain the final suitability map. This was multiplied by a binary map to eliminate areas with restriction for the development of plantations (urban use, bodies of water, highways, slopes of more than 30%, natural vegetation). To facilitate the interpretation of the results, the map was reclassified into four classes of suitability: high (from 0.9 to 1), medium (from 0.8 to 0.9), low (from 0.7 to 0.8) and marginal or null (from 0 to 0.7).

## RESULTS AND DISCUSSION

The experts consistently identified climate as the most important criterion to consider (0.539) followed by soil (0.355). Within climate, they identified the amount of precipitation as the most important sub-criterion (0.625), followed by minimum temperature (0.204). With respect to soil, depth was identified as the most important sub-criterion (0.433), followed by the sub-criterion pH.

de manera diferente la situación planteada, por lo que se encontró variación en sus respuestas (ponderaciones de criterios). Para compatibilizar las diferencias, se calculó el promedio de las estimaciones que fueron consistentes.

En la Figura 5 se muestra la localización espacial de las áreas identificadas como aptas para el establecimiento de la especie en este estudio. En las superficies mostradas hay 38 863 ha con aptitud alta, la cual se considera relativamente reducida, a nivel regional, para el desarrollo de la especie de interés en la región. Pero se identificaron 121 932 ha con aptitud media y 302 551 ha con aptitud baja.

El factor más limitante en el PAJ implementado fue la temperatura mínima, para ello se aplicó una restricción a todo el mapa de aptitud generado para la especie. Áreas con temperatura mínima menor al umbral establecido para la especie (2 °C) no fueron consideradas debido a los daños irreversibles que estas temperaturas ocasionan a las plantas.

En el proceso de estandarización los mapas que tienen datos de valores continuos mostraron mejor bondad de ajuste a los métodos multicriterio, como el modelo de elevación digital (intervalo altitudinal y pendiente), mismo que muestra una transición gradual de sus valores, permitiendo una representación mejor mediante el método de efectos borrosos.

Las técnicas de evaluación multicriterio, particularmente el PAJ-Lógica borrosa, dan una importancia relativa a cada criterio y subcriterios empleados, dando oportunidad de que gran parte de la superficie de interés se considere candidata a un uso específico mediante la compensación de los criterios considerados. Resultados no mostrados indican que la técnica implementada identifica áreas más extensas que el análisis booleano multicriterio tradicional. Esto concuerda con lo señalado por Burrough *et al.* (1992) respecto a que el uso del álgebra booleana para el análisis de aptitud de la tierra implica una pérdida considerable de información. Sin embargo, esto no se puede generalizar ya que los resultados de un análisis booleano dependen de la laxitud con que se definen los intervalos óptimos de los subcriterios en el modelo.

Así, lo expresado anteriormente es una desventaja del método PAJ-Lógica borrosa, ya que al realizar ponderaciones y sumarlas en cada una de sus jerarquías, éstas pueden asignar valores relativamente altos a áreas con relativamente baja aptitud, por lo que como en todo proceso de planificación y análisis, el tomador de decisiones debe tener buen conocimiento del método para corregir posibles desviaciones. Las técnicas usadas en este estudio requieren un mayor grado de conocimiento y entrenamiento, comparado con la técnica

**Cuadro 2. Pesos de los criterios y sub-criterios obtenidos mediante entrevistas con expertos para usar mediante la técnica PAJ-Fuzzy para *E. grandis* Hill.**

**Table 2. Weights of the criteria and sub-criteria obtained through interviews with experts to be used with the AHP-Fuzzy technique for *E. grandis* Hill.**

Criterios principales		Clima	
Criterio	Peso	Subcriterio	Peso
Clima	0.539	Precipitación	0.625
Suelo	0.355	Temp. máxima	0.171
Topografía	0.106	Temp. mínima	0.204
Suelo		Topografía	
Subcriterio	Peso	Subcriterio	Peso
Profundidad	0.433	Intervalo altitudinal	0.568
Textura	0.244	Pendiente	0.432
pH	0.323		

There are discrepancies among authors when reporting the environmental requirements of the species, thus, the requirements in highest coincidences in the literature were taken as valid. The experts analyzed the given situation differently, therefore variation was found in their answers (weighing of criteria). To compatibilize the differences, the average was calculated of the estimations that were considered consistent.

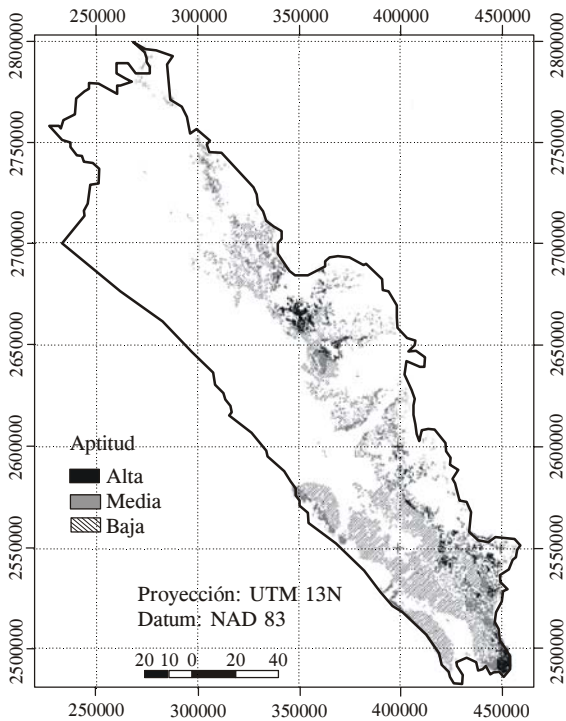
The spatial location of the areas identified as suitable for the establishment of the species in this study is shown in Figures. In the surfaces shown, there are 38 863 ha with high suitability, which is considered relatively low, at the regional level, for the development of the species of interest in the region. However, 121 932 ha with medium suitability were identified, and 302 551 with low suitability.

The most limiting factor in the AHP implemented was minimum temperature, for which a restriction was applied to the entire suitability map for the species. Areas with minimum temperature below the threshold established for the species (2 °C) were not considered, given the irreversible damages that these temperatures cause to the plants.

In the standardization process, the maps that have data of continuous values showed better goodness of fit to the multi-criteria methods, such as the digital elevation model (altitudinal interval and slope), which shows a gradual transition of its values, allowing a better representation through the fuzzy effects method.

The multi-criteria techniques, particularly the AHP-Fuzzy logic, give a relative importance to each criterion and sub-criterion employed, giving an opportunity for a large part of the surface of interest to be considered





**Figura 5. Distribución de las superficies aptas para el establecimiento de *E. grandis* en el centro-sur de Sinaloa, México.**

**Figure 5. Distribution of the surfaces suitable for the establishment of *E. grandis* in the south-central region of Sinaloa, México.**

simple de análisis booleano tradicional (sobreposición de mapas binarios).

Es importante resaltar que los resultados derivan de la aplicación de modelos, es decir, de abstracciones o simplificaciones de la realidad; por tanto, deben usarse sólo como ayuda para la toma de decisiones. Una limitante en el presente trabajo fue la falta de información cartográfica de escala espacial adecuada (> de 1:50 000) de los diferentes criterios empleados (precipitación, temperatura máxima, temperatura, mínima, profundidad, textura, pH), resultando en la construcción de mapas muy generalizados. A pesar de ello, los resultados son información valiosa para la planificación y toma de decisiones de la actividad forestal en la región.

### CONCLUSIONES

Los resultados del análisis permiten aseverar que las condiciones climáticas, edáficas y fisiográficas en la región centro-sur del Estado de Sinaloa, aunado a información espacial de opiniones de expertos, se combinan para definir 38 863, 121 932 y 302 551 ha de aptitud alta, media y baja, para el establecimiento de

a candidate for a specific use through the compensation of the criteria considered. Results not shown indicate that the technique implemented identifies more extensive areas than the traditional multi-criteria Boolean analysis. This concurs with what was indicated by Burrough *et al.* (1992) with respect to the fact that the use of Boolean algebra for the analysis of land suitability implies a considerable loss of information. However, this can not be generalized, given that the results of a Boolean analysis depend on the laxness with which the optimum intervals of the sub-criteria in the model are defined.

Thus, what is expressed above is a disadvantage of the AHP-Fuzzy logic method, given that when weightings are made and added in each one of their hierarchies, they can assign values that are relatively high to areas with relatively low suitability, for which as in any process of planning and analysis, the decision maker must have good knowledge of the method in order to correct possible deviations. The techniques used in this study require a higher degree of knowledge and training, with respect to the simple technique of traditional Boolean analysis (superposition of binary maps).

It is important to point out that the results derive from the application of models, that is, from abstractions or simplifications of reality; therefore, they should be used only as an aid in decision making. One limitation in the present work was the lack of cartographic information of an adequate spatial scale (> 1:50 000) of the different criteria used (precipitation, maximum temperature, minimum temperature, soil depth, texture, pH) resulting in the construction of very generalized maps. In spite of this, the results are valuable information for the planning and decision making of forest activity in the region.

### CONCLUSIONS

The results of the analysis make it possible to affirm that the climatic, soil and physiographic conditions in the south-central region of the State of Sinaloa, added to spatial information taken from opinions of experts, combine to define 38 863, 121 932 and 302 551 ha of high, medium and low suitability for the establishment of plantations of *E. grandis*. The above makes it possible to conclude that the region analyzed does not present the best conditions for the mass development of plantations with the species, but it does have a considerable surface of land that is suitable for developing plantations in the municipalities of San Ignacio, Rosario and Escuinapa.

The precise definition of the degree of land suitability depends to a great extent on the quality of the information used, which in the present study was very

plantaciones de *E. grandis*. Lo anterior permite concluir que la región analizada no tiene las mejores condiciones para el desarrollo masivo de plantaciones con la especie, pero tiene una superficie considerable de tierras aptas para desarrollar plantaciones en los municipios de San Ignacio, Rosario y Escuinapa.

La definición precisa del grado de aptitud de los terrenos depende en gran medida de la calidad de la información usada, la cual en el presente estudio fue muy general. No obstante, los resultados son útiles para una planificación regional de las áreas a plantar con *E. grandis* en el centro-sur de Sinaloa.

De acuerdo con las encuestas realizadas a expertos plantadores, el criterio más importante que influye en la definición de aptitud de terrenos para plantaciones forestales es la precipitación.

#### AGRADECIMIENTOS

A la Comisión nacional Forestal (CONAFOR) y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el financiamiento proporcionado mediante el proyecto 2002-C01-6537/A-1.

#### LITERATURA CITADA

Barredo C., J. I. 1996. Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en la Ordenación del Territorio. Editorial RA-MA. Madrid, España. 259 p.

Burrough, P. A., and R. A. McDonnel. 1998. Principles of Geographical Information Systems. Oxford University Press. New York, USA. 333 p.

Burrough, P. A., R. A. MacMillan, and W. Van Deursen. 1992. Fuzzy classification methods for determining land suitability from soil profile observations and topography. *J. Soil Sci.* 43:193-210.

Ceballos-Silva, A., and J. López-Blanco. 2003. Delineation of suitable areas for crops using multi-criteria evaluation approach and land use/cover mapping: a case study in Central Mexico. *Agric. Systems* 77: 117-136.

Collins, M. G., F. R. Steiner, and M. J. Rushman. 2001. Land-use suitability analysis in the United States: Historical development and promising technological achievements *Environ. Manag.* 28(5): 611-621.

CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad). 2005. Obtención de metadatos y cartografía en línea. <http://conabioweb.conabio.gob.mx/metacarto/metadatos.pl>. Fecha de consulta: 10 de julio de 2005.

Eastman, J. R. 2003. IDRISI version 14.0 Kilimanjaro. Guía para SIG y Procesamiento de Imágenes. Clark Worcester, MA. 290 p.

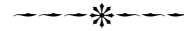
FAO (Food and Agriculture Organization). 1981. El Eucalipto en la Reforestación Forestal. Roma, Italia. 723 p.

FAO (Food and Agriculture Organization). 1985. Evaluación de Tierras para la Agricultura de Secano. Boletín de suelos No. 52. Roma, Italia. 228 p.

general. However, the results are useful for a regional planning of the areas to be planted with *E. grandis* in the south-central region of Sinaloa.

According to the surveys applied to expert planters, the most important criterion that influences the definition of land suitability for forest plantations is precipitation.

—End of the English version—



García R., E., A. Sotomayor, S. Silva P., y G. Valdebenito R. 2000. Establecimiento de plantaciones forestales. Instituto Forestal. Santiago, Chile. 22 p.

Ghribi, M. 2005. GIS Applications for Monitoring Environmental Change and Supporting Decision-making in Developing Countries. International Centre for Science and High Technology, United Nations Industrial Development Organization. 144 p.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática). 2005. Información geográfica, sistemas de descarga del continuo de elevaciones Mexicano. <http://mapserver.inegi.gob.mx/DescargaMDEWeb/?c=619>. Fecha de consulta: 10 de julio de 2005.

Malczewski, J. 1999. GIS and Multicriteria Decision Analysis. John Wiley & Sons. USA. 392 p.

Malczewski J. 2004. GIS-based land-use suitability analysis: A critical overview. *Progress in Planning* 62: 3-65.

Meskimen, G., and J. K. Francis. 1990. *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. *Rose gumeucalyptus*. In: Silvics of North America. Burns, R. M., and B. H. Honkala (eds). *Agric. Handbook* 654. U.S. Department of Agriculture, Forest Service. Washington, D.C. pp: 305-312.

Meza S., R. 2002. Identificación de áreas potenciales para palo de arco mediante el uso de SIG en Baja California Sur. INIFAP-Campo Experimental Todos Santos. Folleto Científico No. 1. La Paz, B.C.S. México. 28 p.

Moreno S., R., y F. Moreno S. 1995. Los sistemas de información geográfica en la administración de recursos naturales: Recomendaciones de las experiencias del INIFAP. *Ciencia For. en Méx.* 20(78): 93-109.

Prakash, T. N. 2003. Land suitability analysis for agricultural crops: A fuzzy multicriteria decision making approach. *Internacional Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC)*. Enschede, The Netherlands. 57 p.

Reygadas P., D. D., F. Moreno S., R. Villareal C., y B. A. Silva T. 2000. Zonas potenciales para plantaciones forestales del área de Zitácuaro, Michoacán. In: *Memoria Digital 1er Congreso Nacional de Reforestación*. SEMARNAP-CP. Montecillo, México.

Saaty, T. L. 1980. *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill. USA. 269 p.

SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales) y CP (Colegio de Postgraduados). 2002. Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana Escala 1:250,000. *Memoria Nacional*. 68 p.

Valdez-Lazalde, J.R., J. López-Upton, y A. Aldrete. 2003. Identificación de especies forestales para el establecimiento de plantaciones maderables y no maderables. *Fichas Técnicas*. Comisión Nacional Forestal-Colegio de Postgraduados. 200 p.