



# **COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

---

**INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN  
EN CIENCIAS AGRÍCOLAS**

**CAMPUS MONTECILLO  
FORESTAL**

**Zonificación de aptitud y productividad de suelos para  
plantaciones de eucalipto en Oaxaca y Veracruz**

**CARINA EDITH DELGADO CABALLERO**

**T E S I S**

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRA EN CIENCIAS**

**MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO**

**2007**

El presente estudio recibió apoyo financiero del proyecto de investigación del Fondo Sectorial CONAFOR-CONACYT, clave 2003-CO3-9925 “Captura de carbono, biodiversidad, productividad y zonificación productiva de plantaciones comerciales en los límites de Oaxaca y Veracruz”

La presente tesis titulada “Zonificación de aptitud y productividad de suelos para plantaciones de eucalipto en Oaxaca y Veracruz”, realizada por CARINA EDITH DELGADO CABALLERO, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada y aceptada como requisito para obtener el grado de:

**MAESTRA EN CIENCIAS  
FORESTAL**

**CONSEJO PARTICULAR**

CONSEJERO

---

Dr. J. René Valdez Lazalde

ASESOR

---

Dr. Armando Gómez Guerrero

ASESOR

---

Dr. Aurelio M. Fierros González

ASESOR

---

Dr. Héctor M. De los Santos Posadas

ASESOR

---

Dr. Jorge Luís Martínez Fonseca

Montecillo, Texcoco, Edo. de México

## AGRADECIMIENTOS

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT)**, por el apoyo financiero otorgado para la realización de mis estudios de maestría.

Al **Colegio de Postgraduados**, en especial al **Postgrado Forestal** por haberme brindado la oportunidad de realizar mis estudios.

A la empresa **Plantaciones de Tehuantepec S. A. de C. V. (PLANTEH)**, por brindar el apoyo para la realización de este trabajo de investigación.

Al **Dr. J. René Valdez Lazalde**, quien dirigió la presente investigación a través de la que se obtuvo el presente documento.

Al **Dr. Armando Gómez Guerrero** por sus valiosas y múltiples aportaciones al enriquecimiento del presente trabajo.

Al **Dr. Aurelio M. Fierros González** por las aportaciones a este trabajo que ayudaron a mejorarlo.

Al **Dr. Héctor M. De los Santos Posadas** por su contribución, conocimientos y sugerencias, con el fin de llevar a cabo éste trabajo.

Al **Dr. Jorge Luís Martínez Fonseca** por su participación y sugerencias durante el desarrollo de esta investigación.

Al **Dr. Arnulfo Aldrete**, por contactarme con las persona expertas a las cuales entrevisté y por sus sugerencias.

Al **Ing. Jorge Santos Espinosa**, por el apoyo otorgado en la etapa de campo de este trabajo.

Al **M. C. Gonzalo López Gijón** por su participación y apoyo en los trabajos de campo.

A todas las personas que aportaron sus conocimientos y experiencia adquirida, en el establecimiento de plantaciones forestales, por su disposición para contestar las encuestas y participando de esta manera en este trabajo.

## **DEDICATORIA**

### ***Con todo mi amor***

#### ***A mi adorado hijo Hernán Gael***

*Por ser la luz que ha iluminado mi vida, y del cual he aprendido que la vida esta hecha de momentos que no podemos dejar pasar.*

#### ***A mi esposo Gonzalo***

*Por haber llegado a mi vida por compartir momentos agradables y tristes y por que nos apoyamos mutuamente en nuestra formación profesional.*

#### ***A mi madre María Caballero.***

*Por haberme apoyado en todo momento, por ser una mujer admirable, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante, pero sobre todo por su amor.*

#### ***A mi padre José Félix Delgado***

*Por ser un ejemplo de fortaleza, de perseverancia y constancia que lo caracterizan y que me ha infundado siempre, por el valor mostrado para salir adelante y por su amor.*

#### ***A mis hermanos Claudia, Osvaldo y Alejandro***

*Por ser mis compañeros y amigos de vida y quienes me han demostrado su apoyo incondicional*

#### ***A la pequeña Valeria mi sobrina***

*Por recordarnos que dios existe y esta con nosotros*

#### ***A mis Abuelitas Ángela Romero y María Félix Blancas***

*Por ser mujeres admirables y el tesoro de la familia*

#### ***A mí cuñado Carlos, a mis tías Cati y Teré y a la familia Bautista Caballero***

*Por su apoyo y cariño demostrado*

#### ***A la familia López Gijón***

*Por las demostraciones de afecto y por su apoyo.*

#### ***A mis amigos entrañables Cointa Casanova y José Luís García***

*Por que aun en la distancia están siempre presentes*

## CONTENIDO

ÍNDICE DE CUADROS	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
RESUMEN	viii
SUMMARY	ix
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1. INTRODUCCIÓN	1
1.2. OBJETIVOS	2
1.2.1. General	2
1.2.2. Específicos	2
1.3. REVISIÓN DE LITERATURA	3
1.3.1. Plantaciones de <i>Eucalyptus</i> spp.	3
1.3.2. Antecedentes de la zonificación potencial de tierras	4
1.3.3. Antecedentes de la aptitud de tierras y la evaluación multicriterio	6
1.3.4. Toma de decisiones multicriterio	7
1.3.5. Métodos de evaluación multicriterio	10
1.3.6. Proceso de Análisis Jerarquizado (AHP)	10
1.3.7. Lógica de transición gradual (Fuzzy)	16
1.3.8. Productividad forestal y su evaluación a partir del índice de sitio (IS)	20
CAPÍTULO II. APTITUD DE ÁREAS PARA PLANTACIONES COMERCIALES DE EUCALIPTO EN OAXACA Y VERACRUZ	21
2.1 RESUMEN	21
2.2 SUMMARY	21
2.3 INTRODUCCIÓN	22
2.4 MATERIALES Y MÉTODOS	23
2.4.1. Localización y descripción del área de estudio	23
2.4.2. Requerimientos ecológicos de <i>Eucalyptus grandis</i>	25
2.4.3. Requerimientos ecológicos de <i>Eucalyptus urophylla</i>	26
2.4.4. Criterios para identificar las áreas aptas a plantar	27
2.4.5. Restricciones para discriminar las áreas no aptas	38
2.4.6. Evaluación multicriterio espacial	41
2.4.6.1. Estandarización de los criterios de evaluación	42
2.4.6.2. Obtención de los pesos (W)	45
2.4.6.3. Generación de mapa de aptitud	45
2.4.7. Álgebra booleana	46
2.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	47
2.6. CONCLUSIONES	54

CAPÍTULO III. SITE INDEX AND SOIL PROPERTIES IN YOUNG PLANTATIONS OF <i>Eucalyptus grandis</i> AND <i>E. UROPHYLLA</i> IN SOUTHEST MÉXICO	55
3.1. ABSTRACT	55
3.2. INTRODUCTION	55
3.3. MATERIALS AND METHODS	56
3.3.1. Study area	56
3.3.2. Plantations description	57
3.3.3. Soil sampling	57
3.3.4. Site index estimates	58
3.3.5. Statistical analysis.	59
3.4. RESULTS	59
3.5. DISCUSSION	63
3.6. CONCLUSIONS	66
CAPÍTULO IV. LITERATURA CITADA	67
ANEXO 1	74

## ÍNDICE DE CUADROS

### CAPÍTULO I

Cuadro 1. Escala fundamental usada en comparación por pares (Saaty, 1980).....	13
Cuadro 2. Ejemplo de matriz de comparación por pares que describe la importancia relativa entre criterios.....	13
Cuadro 3. Valores para el Índice Aleatorio (Saaty, 1980) .....	15

### CAPÍTULO II

Cuadro 4. Superficies de la vegetación y uso del suelo del área de influencia del estudio.....	39
Cuadro 5. Funciones de pertenencia de los requerimientos del <i>E. grandis</i> respecto a los criterios ecológicos del área de estudio. ....	43
Cuadro 6. Funciones de pertenencia de los requerimientos del <i>E. urophylla</i> respecto a los criterios ecológicos del área de estudio. ....	44
Cuadro 7. Resumen de los resultados de las matrices de comparación pareada y pesos asignados a cada criterio de evaluación.....	47
Cuadro 8. Número de sitios por especie e IS distribuidos en las áreas de aptitud media y baja. ....	53
Cuadro 9. Superficies de grado de aptitud por método y municipio (ha). ....	53

### CAPÍTULO III

Table 10. Surface soil properties measured at the 45 study sites.....	57
Table 11. Stand parameters for the 45 study plots. ....	60
Table 12. Correlation matrix for SI and soil properties at 0-5 cm soil depth.....	61
Table 13. Correlation matrix for SI and soil properties at 5-15 cm soil depth.....	61
Table 14. Correlation matrix for SI and soil properties at 15-30 cm soil depth. ....	62
Table 15. Estimated parameters for the different soil depths sampled.....	63

## ÍNDICE DE FIGURAS

### CAPÍTULO I

- Figura 1. Formas básicas de funciones de pertenencia: triangular (a), trapezoidal (b) y Gaussiana (c) (McBratney y Odeh, 1997). ..... 17
- Figura 2. Función de pertenencia para el criterio precipitación anual de la especie *E. grandis*..... 19

### CAPÍTULO II

- Figura 3. Localización del área de estudio. .... 24
- Figura 4. Precipitación del área de influencia del estudio..... 29
- Figura 5. Temperatura media anual del área de influencia del proyecto. .... 30
- Figura 6. Temperaturas mínimas del área de influencia del proyecto..... 31
- Figura 7. Temperaturas máximas del área de influencia del proyecto. .... 32
- Figura 8. Profundidad del suelo del área de influencia del proyecto..... 33
- Figura 9. Textura del suelo del área de influencia del proyecto..... 34
- Figura 10. pH del área de influencia del proyecto..... 35
- Figura 11. Altitud del área de influencia del proyecto..... 36
- Figura 12. Pendientes del área de influencia del proyecto. .... 37
- Figura 13. Vías de acceso del área de influencia del proyecto. .... 38
- Figura 14. Vegetación y uso del suelo del área de influencia del proyecto..... 40
- Figura 15. Mapa de áreas factibles para el establecimiento de plantaciones..... 41
- Figura 16. Estructura jerárquica de los criterios y subcriterios considerados en el estudio..... 42
- Figura 17. Esquema metodológico que muestra la secuencia de evaluación y utilización del método de evaluación multicriterio conocido como AHP..... 46
- Figura 18. Zonificación y distribución de superficies con aptitud para *Eucalyptus grandis*: a) Evaluación multicriterio (AHP-Fuzzy), b) Álgebra booleana. .... 49
- Figura 19. Zonificación y distribución de superficies con aptitud para *Eucalyptus urophylla*: a) Evaluación multicriterio (AHP-Fuzzy), b) Álgebra booleana. .... 50
- Figura 20. Áreas con plantaciones establecidas con sitios de muestreo, a) *E. grandis* y b) *E. urophylla* ..... 52

### CAPÍTULO III

Figure 21. Location of the 13 plantations where 45 study sites of <i>E. grandis</i> y <i>E. urophylla</i> were established at the Santiago Yaveo, Oaxaca area.....	56
Figure 22. Soil depths monitored for dry bulk density in the study.....	58
Figure 23. Relationship between SI and sand content at the three soil depths sampled. ....	62

## RESUMEN

Este estudio es una contribución a la identificación de áreas aptas para el establecimiento de plantaciones forestales comerciales (PFC) de *Eucalyptus* en el sureste de México. El trabajo se realizó en plantaciones establecidas por la empresa Plantaciones de Tehuantepec (PLANTEH) en el Municipio de Santiago Yaveo, Oaxaca y en un área de influencia que comprende cinco municipios del Estado de Oaxaca (San Juan Guichicovi, Santiago Yaveo, San Juan Cotzocón, San Juan Mazatlán y Matías Romero) y siete en el Estado de Veracruz (Playa Vicente, Juan Rodríguez Clara, Santiago Sochiapan, San Juan Evangelista, Sayula de Alemán, Texistepec y Jesús Carranza).

La identificación de áreas aptas se realizó considerando los requerimientos ecológicos de las especies mediante análisis de decisión multicriterio, combinando técnicas como el Proceso de Análisis Jerarquizado (AHP) y Lógica Fuzzy, además de la incorporación del conocimiento de expertos en plantaciones forestales a través de matrices de comparación por pares en un entorno de sistemas de información geográfica (SIG). Adicionalmente se realizó una comparación con el método Booleano convencional. Los resultados muestran de manera contundente que técnicas como el AHP y la Lógica Fuzzy dan una mejor representatividad de la variabilidad de aptitud. En general puede afirmarse que la mayor parte del área es potencial para el establecimiento de plantaciones de *Eucalyptus*.

Por otra parte, y con el objetivo de establecer algún indicador de productividad, se analizaron las relaciones entre el índice de sitio (IS) y variables edáficas (textura, pH, materia orgánica, densidad aparente, capacidad de intercambio catiónico (CIC), color y mineralización de N del suelo); para ésto se levantaron muestras de suelo en 45 sitios a tres profundidades: de 0 a 5, 5 a 15 y de 15 a 30 cm. Los resultados mostraron que sólo las variables CIC y textura del suelo están correlacionadas con el índice de sitio (productividad); encontrándose que el índice de sitio esta directamente relacionado con el contenido de arena (a mayor contenido de arena, mayor IS).

Palabras clave: *Eucalyptus*, Evaluación multicriterio, Proceso de Análisis Jerarquizado (AHP), Lógica Fuzzy, Índice de Sitio.

## SUMMARY

This study is a contribution to the identification of suitable areas for the establishment of forest plantations of *Eucalyptus* in the Southeastern of Mexico. The work was carried out in plantations established by the PLANTEH company in the municipality of Santiago Yaveo, Oaxaca and in a surrounding area that include five municipalities of the state of Oaxaca (San Juan Guichicovi, Santiago Yaveo, San Juan Cotzocón, San Juan Mazatlán y Matías Romero) and seven of the Veracruz state (Playa Vicente, Juan Rodríguez Clara, Santiago Sochiapan, San Juan Evangelista, Sayula de Alemán, Texistepec y Jesús Carranza). The identification of suitable areas was done considering the ecological requirements of the species through the application of a Multicriteria Decision Analysis, combining techniques such as the Analytical Hierarchy Process (AHP) and fuzzy logic, besides the incorporation of experts' knowledge in forest plantations through pairwise comparisons in a SIG environment. Additionally a comparison with the conventional boolean method was made. The results show, in a forceful way, that techniques such as AHP and fuzzy logic give a better representation of the variability in suitability. In general it is possible to affirm that most of the area analyzed has potential for the establishment of eucalyptus plantations.

On the other hand, and with the objective of identifying a indicator of land productivity, relations between soil variables (texture, pH, organic matter, dry bulk density, cation exchange capacity (CEC), color and N mineralization) and site index were analyzed. To accomplish this objective forty five plots were measured and soil samples were obtained at 0-5, 5-15 and 15-30 cm depths. The results showed that only the soil variables CIC and texture are correlated to site index (productivity); finding that site index is directly related to sand content (the greater the sand content, the greater the growth)

Key words: *Eucalyptus*, Multicriteria Evaluation, Analytic Hierarchy Process (AHP), Fuzzy logic, Site Index.

## **CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN GENERAL**

### **1.1. INTRODUCCIÓN**

México cuenta con escenarios favorables para el establecimiento de plantaciones forestales de escala industrial, sin embargo, es necesario eliminar políticas restrictivas y facilitar el acceso a la tierra para que esta actividad se desarrolle y contribuya a resolver necesidades urgentes del sector forestal, como el de la industria de la celulosa, cuya competitividad se encuentra en su nivel más bajo en el ámbito internacional, debido entre otras cosas, al costo elevado de la materia prima (CONAFOR, 2001).

Por el anterior, el gobierno mexicano ha considerado estratégico apoyar el desarrollo de plantaciones forestales comerciales (PFC) (SEMARNAT, 1996). A partir de 1997 se instrumentó el Programa de Plantaciones Forestales Comerciales (PRODEPLAN), un programa de subsidios para apoyar el desarrollo de esta actividad (Fierros y Sosa, 2000).

Se ha estimado un potencial en el país de aproximadamente 10.7 millones de hectáreas aptas para el desarrollo de PFC. De éstas, el 50% se localizan en el sureste mexicano, específicamente en la región conocida como Golfo Sureste, la cual comprende parte de los estados de Oaxaca, Veracruz, Tabasco y la totalidad de la Península de Yucatán; además de otras áreas cercanas a esas entidades federativas (CONAFOR, 2001; CONAFOR, 2003).

Es sabido que el noreste del Estado de Oaxaca y el sureste de Veracruz poseen condiciones ecológicas apropiadas para el desarrollo de PFC, resultado de las características favorables de precipitación, suelo, elevación y temperatura presentes. A pesar de ello, es necesario desarrollar estudios que permitan discriminar, en un ámbito regional-local y de manera precisa, las áreas de mayor aptitud para establecer las PFC que requiere el país para satisfacer el déficit actual de productos derivados de la madera. Afortunadamente ya existen en esta región experiencias de plantaciones, mismas que pueden ser utilizadas como puntos de partida para asegurar el éxito de los objetivos definidos para este trabajo.

La diversidad de condiciones existentes en el país, sumada a una demanda creciente de productos de madera y fibra para celulosa, ha provocado la necesidad de generar modelos

de productividad, espacialmente explícitos, que permitan definir con precisión aceptable los terrenos más aptos para desarrollar los proyectos de PFC. Las consecuencias sociales y económicas derivadas de seleccionar sitios inadecuados de plantación pueden resultar inaceptables para la sociedad e inversionistas del ramo.

Plantaciones de Tehuantepec S.A. de C.V. (PLANTEH) es una empresa mexicana que está desarrollando un proyecto de plantaciones forestales industriales de eucalipto para la producción de materias primas celulósicas y maderables, en una extensión programada de 20,624 hectáreas, en los límites de los estados de Oaxaca y Veracruz; metas que podrían incrementarse en el futuro. El proyecto inició en 1997 con el apoyo de PRODEPLAN, teniendo 1,717 ha plantadas hasta 2003, de un total de 2,216 ha contratadas (INDUFOR Ltd. y CONFORA, 2003).

El presente estudio responde a la necesidad de la empresa PLANTEH de ubicar los mejores terrenos para el establecimiento de plantaciones de *Eucalyptus grandis* y *E. urophylla* como una estrategia que asegure el éxito de las plantaciones.

## **1.2. OBJETIVOS**

### **1.2.1. General**

Elaborar una zonificación del grado de aptitud para el establecimiento de plantaciones forestales comerciales de *Eucalyptus grandis* y *E. urophylla* en cinco municipios del Estado de Oaxaca (San Juan Guichicovi, Santiago Yaveo, San Juan Cotzocón, San Juan Mazatlán y Matías Romero) y siete del Estado de Veracruz (Playa Vicente, Juan Rodríguez Clara, Santiago Sochiapan, San Juan Evangelista, Sayula de Alemán, Texistepec y Jesús Carranza).

### **1.2.2. Específicos**

- ♦ Establecer el patrón de variación espacial de aptitud para el desarrollo de plantaciones comerciales de eucalipto en el área de influencia del proyecto PLANTEH.

- ◆ Aplicar diferentes técnicas (álgebra booleana, técnicas fuzzy y análisis multicriterio) para definir el grado de aptitud de los terrenos para el establecimiento de PFC.
- ◆ Identificar y cuantificar las superficies aptas por especie (*Eucalyptus grandis* y *E. urophylla*) para el establecimiento de plantaciones forestales comerciales en el área, con el apoyo de sistemas de información geográfica.
- ◆ Relacionar propiedades del suelo con el Índice de Sitio (IS) de las plantaciones ya establecidas en el área de estudio

### **1.3. REVISIÓN DE LITERATURA**

#### **1.3.1. Genero *Eucalyptus* spp.**

Los eucaliptos son originarios de Australia, existiendo más de 600 especies. Algunas de ellas son comercialmente importantes para la producción de madera, pulpa para papel y aceites esenciales (Hartney, 1995).

El género *Eucalyptus* pertenece a la familia Myrtaceae y está dividido en secciones, series, subseries, superespecies, especies y subespecies. Las características fenotípicas más importantes es que presentan hojas que pueden ser penivenadas y oblicuas cuya venación forma un ángulo de 45°. La corteza de la mayoría de los miembros del género es decidua, el tallo presenta yemas epicómicas que son las responsables de los rebrotes; en un corte transversal pueden apreciarse los anillos de crecimiento y el duramen. Presenta inflorescencia en racimo que junto con los estambres sirven de base para establecer criterios taxonómicos. La mayoría de estas especies toleran bajas altitudes. Se considera que todas las especies originarias de Australia han desarrollado mecanismos de sobrevivencia y tienen bastante éxito al ser introducidas en otros países bajo condiciones climáticas y edáficas similares (FAO, 1981).

Este género concentra las especies forestales de mayor interés para establecer PFC, citando entre las características deseables las siguientes: posibilidad de producir un volumen grande de madera en un periodo de tiempo corto; capacidad de recuperación ante la acción

negativa del fuego, sequía y ramoneo; colonización de suelos pobres, deteriorados por erosión o agricultura irracional y poder de transformación de formaciones vegetales de escaso valor económico o selvas subtropicales degradadas, en montes productivos de fácil manejo (Golfari, 1985). Las especies de eucalipto han demostrado un gran potencial y se cultivan en diferentes regiones tropicales del mundo, alcanzando crecimientos similares o incluso superiores a los de su origen, lo cual indica la bondad de su comportamiento y la adaptabilidad que tienen a condiciones ambientales muy diversas (FAO, 1981).

*Eucalyptus* spp. se introdujo a México a principios del siglo XX y se ha usado en gran escala para la restauración de tierras degradadas; desde 1920 ha sido muy popular en proyectos de reforestación gubernamentales. Para propósitos comerciales se utiliza desde hace poco más de 10 años. Actualmente hay más de 25 especies diferentes plantadas en todo el país pero sólo algunas son para uso industrial (Pérez-Vera *et al.*, 2005). *E. grandis* y *E. urophylla* están siendo plantados a gran escala en regiones tropicales de México con turnos de seis a ocho años, siendo el sureste del país la principal región productora con la mitad de la superficie del área total de plantaciones forestales y se espera que continúe en desarrollo por su rápido crecimiento, su condición fitosanitaria favorable y su utilidad industrial (Escalante y Monreal, 2002), la producción de eucalipto se destina, entre otros usos, a fabricar papel.

### **1.3.2. Antecedentes de la zonificación potencial de tierras**

Al hablar de una zonificación potencial nos referimos a la clasificación de aptitud de la tierra, que según la FAO (1985) representa un resultado parcial de la evaluación y agrupación de áreas de tierra específicas en términos de su aptitud para usos definidos. Esta aptitud esta en función de los requerimientos ecológicos de la especie y las características del sitio.

Desde hace varios años se han desarrollado numerosos sistemas para la evaluación de tierras a nivel mundial. FAO desarrolló una metodología para la evaluación sistemática de los recursos naturales y dentro de este contexto proporciona las metodologías: "Esquema para Evaluación de Tierras" (1976) y la "Zonificación Agroecológica" (1997).

En el marco de evaluación de la FAO, uno de los principios fundamentales es la necesidad de usar un método multidisciplinario; además de los especialistas en la propia evaluación de tierras. Las disciplinas que se necesitan en un estudio de evaluación son: estudios de suelo, agroclimatología, geomorfología, conservación de suelos, agronomía, uso de tierras, sistemas de explotación, economía y sociología (FAO, 1985).

El proceso de evaluación de tierras no determina por si mismo los cambios en el uso de la tierra que deberían adoptarse, pero facilita los datos que permiten tomar esas decisiones, ya que el objetivo principal de la evaluación es poner a disposición del usuario, se trate del agricultor, el planificador, o funcionario de gobierno, la información adecuada referente a los recursos de la tierra y su uso más adecuado. Dicha información es necesaria para adoptar decisiones de planificación, desarrollo y ordenación (FAO, 1985).

Una de las ventajas de los estudios de evaluación de tierras con el método de la FAO es que puede producir resultados precisos, de acuerdo a la escala que se realicen. Sin embargo, dada la gran cantidad de datos de suelo y ambiente que se utilizan, presentan algunas posibles desventajas como: a) la dificultad de participación e integración de todas las disciplinas involucradas o relacionadas con el uso del suelo, b) la dificultad que implica en tiempo y dinero la obtención, el análisis e integración de diferentes conjuntos de datos y c) no siempre se adaptan a las diferentes regiones de nuestro país (Dutch *et al.*, 1981).

Por lo que respecta a los estudios de zonificación agroecológicos, en 1997 la FAO publicó una guía general con una metodología para la Zonificación Agroecológica (ZAE). El módulo central o de aplicaciones básicas de la metodología ZAE estima la aptitud de tierras y la productividad potencial para usos específicos. Define a la zonificación agroecológica como la división de un área geográfica en unidades más pequeñas con características similares en cuanto a la aptitud para ciertos cultivos, al potencial de producción y al impacto ambiental de su utilización. Una de las desventajas de este tipo de estudios es que no realiza una jerarquización de las variables consideradas y supone que todas ellas tienen la misma importancia relativa en la definición de las áreas potenciales de los cultivos lo cual, en la realidad, no es necesariamente cierto (FAO, 1997).

En México, la evaluación de la potencialidad o aptitud de terrenos forestales para desarrollar especies arbóreas se ha realizado mediante técnicas cartográficas simples como el método Booleano asistido con sistemas de información geográfica (SIG) (Flores y Moreno, 1994; Moreno *et al.*, 1994; Baca, 1998; Meza, 2001 y 2003; Barcenas, 2002; Rivera, 2003) este método sólo identifica las áreas óptimas (las que cumplen con todos los requerimientos de la especie). En este tipo de estudios intervienen factores como el suelo y el clima, los que a su vez se pueden dividir en varios subfactores (criterios) y se asume que todos ellos influyen de la misma manera.

Sin embargo, no todos los criterios tienen la misma influencia en el éxito de la plantación. Por el contrario, es más probable que todos contribuyan en diferente grado. Recientemente diversos estudios han implementado metodologías más complejas basadas en los conceptos del Análisis de Decisión Multicriterio y la Lógica Fuzzy, como una alternativa de análisis, los cuales permiten identificar diferentes grados de aptitud en los terrenos (Van Ranst *et al.*, 1996; García *et al.*, 2001; Chirici *et al.*, 2002; Ceballos-Silva y López-Blanco, 2003; Prakash, 2003; Braimoh *et al.*, 2004; García *et al.*, 2004; Bustillos, 2006 y Olivas, 2006).

### **1.3.3. Antecedentes de la aptitud de tierras y la evaluación multicriterio**

La Evaluación Multicriterio para identificar áreas con propósitos específicos dentro de un contexto de Sistemas de Información Geográfica ha sido utilizada en distintas áreas (Malczewski, 2004), en el caso de la aptitud de tierras el uso es relativamente nuevo y se ha aplicado principalmente en agricultura para identificar áreas aptas para cultivos con datos de producción (Van Ranst *et al.* 1996; García *et al.*, 2001; Ceballos-Silva y López-Blanco, 2002; Prakash, 2003; Braimoh *et al.*, 2004).

En el área forestal esta técnica también se ha utilizado principalmente para identificar áreas potenciales para el establecimiento de plantaciones. Chirici *et al.* (2002) utilizaron técnicas fuzzy combinadas con evaluación multicriterio para identificar áreas potenciales para el establecimiento de plantaciones de *Junglas regia* y *Pseudotsuga menziensis* en Italia meridional. García *et al.* (2004) desarrollaron una metodología para discriminar áreas potenciales para el establecimiento de plantaciones de *Pinus cembroides* en el Estado de Guanajuato, con un enfoque de transición gradual utilizando técnicas fuzzy. Bustillos

(2006) y Olivas (2006) hicieron una comparación del Proceso Analítico Jerarquizado (AHP por sus siglas en inglés), y una combinación de Lógica Fuzzy más AHP con el método Booleano convencional, en Sinaloa y Durango respectivamente.

Los autores antes mencionados han concluido que el uso de la Evaluación Multicriterio Espacial, es una técnica que tiene varias ventajas sobre el método Booleano, ya que intenta hacer explícito el proceso lógico del pensamiento de un individuo al tomar una decisión, tomando en cuenta la influencia que tiene cada factor en la producción del cultivo o plantación, una mejor representación de la variabilidad espacial y un mejor aprovechamiento de la información disponible.

#### **1.3.4. Toma de decisiones multicriterio**

Una decisión es el resultado de una comparación de una o más alternativas con base en criterios que consideramos relevantes para la decisión. Entre estos criterios relevantes consideramos algunos de mayor importancia y algunos menos importantes. Para la mayoría de nuestras decisiones diarias que tienen un impacto solamente sobre nosotros mismos y nuestro futuro inmediato, generalmente atribuimos intuitivamente pesos a los criterios de decisión relevantes. Mientras tal enfoque instintivo podría ser fácil para decisiones personales, es difícil de justificar cuándo el problema implica una gran cantidad de criterios a tomar en cuenta y es tan complejo que es necesaria la intervención de personas expertas en ese campo (Marionni, 2004). El método de evaluación multicriterio trata de hacer explícito el proceso lógico del pensamiento humano tomando en cuenta la influencia que tiene cada criterio sobre el objetivo a lograr a través de un conjunto de técnicas que analicen las distintas alternativas que lo satisfagan, y donde los criterios sean clasificados y ponderados con respecto a su relación o importancia.

Según Malczewski (1999) los problemas multicriterio involucran seis componentes:

1. Una meta o conjuntos de meta de decisión
2. Los tomadores de decisiones, junto con sus preferencias respecto a los criterios de evaluación.

3. Un conjunto de criterios de evaluación (objetivos y/o atributos) sobre la base de los cuales se valorarán las distintas líneas de acción alternativas.
4. El conjunto de alternativas o las variables de decisión.
5. El conjunto de variables incontrolables o estados de naturaleza (decisión ambiental)
6. El conjunto de consecuencias o resultados (salidas) asociadas a cada par de alternativa-atributo.

### ***Estructura de un problema de evaluación multicriterio espacial***

Un proceso de toma de decisión abarca una secuencia de actividades que según Malczewski (1999) podría ser la siguiente:

**Definición del problema.** El proceso comienza con el reconocimiento y definición del problema. El tomador de decisiones percibe la existencia de diferencias entre el estado actual y el estado deseado para un sistema.

**Elección de los criterios de evaluación.** La toma de decisiones multicriterio espacial requiere la identificación de los criterios o atributos útiles para indicar el grado en el cual se alcanzan los objetivos. Los atributos y objetivos forman una estructura jerárquica de los criterios de evaluación y deben poseer ciertas características para representar adecuadamente la naturaleza del problema de decisión multicriterio. Cada criterio debe ser comprensible y medible. Un conjunto de criterios debe ser completo<sup>1</sup>, operacional<sup>2</sup>, divisible<sup>3</sup>, no redundante<sup>4</sup> y mínimo<sup>5</sup>.

**Generación de mapas de criterios.** Ya identificados, los criterios de evaluación son asociados a entidades geográficas y a relaciones entre entidades, por lo cual pueden ser representados mediante mapas de atributos o mapas temáticos y mapas de restricción, los cuales despliegan el conjunto de alternativas factibles.

---

1 Los atributos deben cubrir todos los aspectos del problema de decisión

2 Podrán ser utilizados significativamente en el análisis

3 Podrán dividirse en partes para simplificar el proceso

4 Evitar problemas de repetición

5 El número de criterios debe ser tan pequeño como sea posible

**Escalas de medición.** Para que un mapa temático sea útil, es necesario definir una escala para describir su nivel relativo. Los atributos pueden ser medidos en escalas cualitativas (tipos vegetación) y cuantitativas (mapas de altitud, profundidad del suelo, precipitación, entre otros).

**Estandarización de criterios.** Dada la variedad de escalas de medición de los atributos, el análisis de decisión multicriterio requiere que los valores de los mapas de criterios sean transformados a unidades compatibles. Para este fin, los mapas de criterio pueden ser estandarizados a través de métodos como: escala de transformación lineal, aproximación de la función de valor/utilidad, aproximación determinística y técnicas fuzzy, entre otras. Al convertir los mapas a escalas estándares, se legitima la acumulación de las puntuaciones o niveles de criterios para formar un valor único de aptitud (Malczewski, 2004).

**Generación de alternativas.** Sobre la base de los mapas criterio se hace un filtrado para decidir qué alternativas han de ser tomadas en cuenta, muy pocos problemas de decisión espacial pueden ser considerados irrestrictos. Las restricciones imponen el espacio de decisión, determinando el conjunto de alternativas factibles.

**Asignación de pesos.** En esta etapa, las preferencias del tomador de decisiones con respecto a los criterios de evaluación son incorporadas en el modelo de decisión. Las preferencias son típicamente expresadas en términos de pesos con el propósito de expresar la importancia de un criterio con respecto al otro. La derivación de los pesos es un tema central en la extracción de las preferencias de los tomadores de decisión.

**Reglas de decisión.** Aquí se conjuntan los resultados de los tres pasos anteriores. Mediante una regla de decisión o función de agregación apropiada, se ordenan las alternativas. Aquí se combinan los criterios de evaluación, las alternativas y las preferencias del usuario, mediante reglas diseñadas para seleccionar la “mejor” alternativa, destacar otras alternativas considerables y clasificar las alternativas en orden de preferencia.

**Análisis de sensibilidad.** Sirve para valorar la robustez del proceso al determinar cómo afectan cambios pequeños en las entradas del análisis a la línea de acción recomendada (la salida). Ante un resultado manifiestamente insatisfactorio se deberá reformular el problema.

### **1.3.5. Métodos de evaluación multicriterio**

Las técnicas de análisis multicriterio (MCA) son herramientas de soporte de decisión que permiten relacionar la variedad de criterios que pueden influir en una decisión, para el caso de la aptitud de la tierra pueden intervenir aspectos ecológicos, sociales, y económicos. Existen diversas técnicas de evaluación multicriterio aplicables a la evaluación de la aptitud de la tierra para un uso del suelo, entre las cuales destacan la suma lineal ponderada, la más sencilla y más frecuentemente aplicada (Eastman, 2003). Otra técnica de evaluación multicriterio empleada con este propósito es el análisis de punto ideal, en el cual se calculan las distancias de cada alternativa con respecto a un punto ideal para cada criterio. La mejor alternativa (unidad espacial) será aquella que tenga una menor distancia al punto ideal. Se han desarrollado diversas técnicas que emplean distintas medidas de distancia al punto ideal (Barredo, 1996; Malczewski, 1996).

El proceso de análisis jerarquizado (AHP, Analytic Hierarchy Process) empleado en este trabajo, es una metodología multicriterio ofrecidas por la teoría de decisiones, la cual ha desarrollado una técnica para la clasificación y ponderación de los criterios con respecto a su relación e importancia mediante una matriz de comparación por pares y ha sido incorporada en distintas aplicaciones SIG para la realización de análisis de aptitud (Ceballos-Silva y López-Blanco, 2003; Prakash, 2003; Bustillos, 2006; Olivas, 2006). Este método combina la metodología de soporte de decisión con el poder de visualización y la capacidad de mapeo, facilitando la creación de mapas de aptitud de uso de las tierras. Algunos programas de SIG's lo han implementado, como IDRISI (Clark Labs, 2003) y ArcGis 8.2 (ESRI Inc., 2002). A continuación se da una descripción más detallada de este método.

### **1.3.6. Proceso de Análisis Jerarquizado (AHP)**

El proceso de análisis jerarquizado (AHP) es una metodología de análisis multicriterio desarrollada por Saaty (1980) y consiste en formalizar la comprensión intuitiva de problemas complejos mediante la construcción de un modelo jerárquico que básicamente contiene tres niveles: meta u objetivo, criterios y alternativas.

El AHP esta basado en tres principios básicos (Malczewski, 1999):

1. Descomposición: Es necesario que el problema de decisión se desglose en jerarquías que muestren los elementos esenciales del problema.
2. Comparación por pares: Crear las matrices de comparación para todos los elementos o criterios bajo evaluación para derivar los pesos o las preferencias.
3. Composición jerárquica: Agregar estas comparaciones sobre la jerarquía para llegar a la evaluación final.

Y cuatro axiomas que constituyen la teoría:

**Reciprocidad.** Dadas dos alternativas  $A_i$  y  $A_j \in A \times A$ , la intensidad de preferencia de  $A_i$  sobre  $A_j$  es inversa a la preferencia de  $A_j$  sobre  $A_i$ .

**Homogeneidad.** Bajo el contexto metodológico, la homogeneidad apunta a que los elementos a comparar deben ser de un mismo orden de magnitud. Esto significa que los elementos de un nivel de jerarquía determinado deben compararse preferiblemente dentro de la escala 1 a 9 del AHP.

**Dependencia.** En los elementos de dos niveles consecutivos en la jerarquía y dentro de un mismo nivel.

**Expectativas.** La jerarquía es un modelo que representa todos los criterios y alternativas. Este axioma está relacionado con la necesidad de agregar o eliminar alternativas a modo de representar fielmente la percepción de los actores involucrados en el proceso de decisión.

El procedimiento AHP involucra tres pasos importantes:

#### **i. Desarrollo de la jerarquía AHP**

El primer paso es descomponer el problema de decisión en una jerarquía compuesta de los elementos más importantes del problema de decisión, el nivel más alto es la meta de la decisión. La jerarquía desciende entonces de lo general a lo más específico hasta alcanzar el nivel de atributos. Éste es el nivel contra el que se evalúan las alternativas de decisión, el

nivel más bajo de la jerarquía. Cada nivel debe unirse al próximo nivel superior. Típicamente, la estructura jerárquica consiste en cuatro niveles: la meta, objetivos, atributos, y alternativas. Las alternativas son representadas en una base de datos SIG. Cada capa contiene los valores de los atributos asignados a las alternativas, y cada alternativa (ej., celda o polígono) se relaciona a los elementos de niveles superior (atributos). El concepto de atributo se une al método de AHP para procedimientos basados en SIG.

Aunque la estructura jerárquica consiste típicamente en una meta, objetivos, atributos, y alternativas, una variedad de elementos relevantes para una decisión en particular y una combinación diferente de estos elementos pueden usarse para representar un problema de decisión.

## **ii. Comparación pareada (pairwise) de los elementos de decisión**

### **Desarrollo de la matriz de comparación**

Una vez construido el modelo jerárquico con base en lo anteriormente expuesto y siguiendo el proceso de toma de decisiones, las preferencias de los tomadores de decisión se analizan mediante una técnica donde todos los criterios identificados son comparados uno con otro en una matriz de comparación por pares, que es una medida que expresa la preferencia relativa entre criterios, generando una escala y atribuyendo valores numéricos a juicios subjetivos.

Saaty (1980) generó una escala para la comparación que consta de valores que van del 1 al 9 para describir la intensidad de la importancia donde el valor 1 expresa “igual importancia” y 9 “importancia extrema” sobre otro criterio (Cuadro 1).

Cuadro 1. Escala fundamental usada en comparación por pares (Saaty, 1980).

Intensidad de importancia	Definición	Explicación
1	Igual importancia	Dos actividades contribuyen igualmente a lograr el objetivo
3	Moderada importancia	La experiencia y los juicios favorecen levemente una actividad sobre otra
5	Fuerte importancia	La experiencia y los juicios favorecen fuertemente una actividad sobre otra
7	Muy fuerte o importancia demostrada	Una actividad es mucho más favorecida sobre la otra y la dominancia es demostrada en la práctica
9	Importancia extrema	La evidencia que favorece una actividad sobre otra es absoluta y totalmente clara
2,4,6,8	Valores intermedios entre los valores de escala	Cuando es necesario un termino medio
Recíproco distinto a 0	Si se asigna el valor $a_{ij}$ al comparar la actividad $i$ con la actividad $j$ , entonces se asigna $a_{ji}=1/a_{ij}$ comparar la $j$ con la $i$ .	Supuesto razonable

En el Cuadro 2 se muestra un ejemplo simple de una matriz de comparación de tercer orden donde tres criterios son comparados uno con otro. En la comparación directa de los criterios C1 y C3, por ejemplo, el criterio C1 ha sido considerado fuertemente más importante que C3, por lo que el valor “5” ha sido asignado a la posición correspondiente en la matriz. La posición transpuesta automáticamente obtiene el valor recíproco, en este caso 1/5 el cual es igual a 0.2.

Cuadro 2. Ejemplo de matriz de comparación por pares que describe la importancia relativa entre criterios.

Criterio	C1	C2	C3
C1	1	4	5
C2	0.25	1	0.5
C3	0.2	2	1

## **Cálculo del vector de prioridades**

Después de la comparación, la asignación de los valores son sintetizados para determinar un ranking<sup>6</sup> de los criterios en términos numéricos, los cuales son equivalentes a los pesos de los criterios, llamado también vector de prioridades de acuerdo con Elineema (2002). El cálculo de este vector se basa en el teorema que indica que el vector característico deseado es obtenido cuando se normalizan las sumas de las filas del límite de la potencia de la matriz primitiva  $A$  (matriz de comparación pareada). Esta operación puede realizarse elevando la matriz  $A$  a grandes potencias (se obtiene rápidamente una convergencia si se eleva al cuadrado la matriz  $A$  sucesivamente). Se calculan las sumas de las filas y se normaliza. El cálculo se detiene cuando la diferencia entre estas sumas de las filas se normaliza; es decir cuando la diferencia entre estas sumas en dos cálculos consecutivos sea más pequeña que un valor prefijado. En ocasiones este cálculo es complicado y es muy práctico utilizar programas adecuados para ello como el Expert Choice o IDRISI.

## **Consistencia de la matriz de comparación**

Por supuesto, los valores de la matriz de comparación normalmente son bien considerados y no puestos arbitrariamente, sin embargo, la impresión y preferencias de las personas que generan las matrices pueden ser inconsistentes y pueden llevar a disturbios en el cálculo del vector de prioridades. Tales contradicciones pueden ser de la forma que un criterio  $A_i$  es preferido sobre otro  $A_j$  y a su vez este puede ser preferido sobre un  $A_k$ , pero  $A_i$  no es preferido sobre  $A_k$ , ( $A_i$  debe ser preferido sobre  $A_k$ ). Por esta razón Saaty (1980) adicionalmente ideó un índice numérico sencillo para verificar la consistencia de la matriz de comparación por pares. Definió una razón de consistencia (RC) como la razón del índice de consistencia (IC) entre un índice de consistencia promedio también llamado índice aleatorio (IA) y es considerada aceptable si es menor o igual a 0.10 (10%); es decir, se acepta la estimación de los pesos cuando  $RC \leq 10\%$ . En caso contrario se concluirá que la matriz tiene demasiadas inconsistencias y debe ser corregida.

---

<sup>6</sup> Orden de prioridades o preferencias

El IC de la matriz de comparación por pares esta dado por:

$$IC = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad \text{Ecuación (1)}$$

Donde  $n$  es el número de criterios usados y  $\lambda_{\max}$  se calcula multiplicando la matriz de comparación por el vector de prioridades dando como resultado un segundo vector, posteriormente se dividen los componentes de este vector entre el primero. El promedio de los componentes de este vector da como resultado el valor de  $\lambda_{\max}$ .

El resultado del IA, fue calculado por Saaty (1980) como la consistencia promedio de la matriz cuadrada de varios ordenes  $n$ , los valores de consistencia promedio se muestran en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Valores para índice aleatorio (IA) (Saaty, 1980)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
I.A.	0.000	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.40	1.41	1.45	1.49	1.51	1.56	1.57	1.59

### iii. Construcción de un orden de prioridad global.

El paso final es agregar los pesos relativos de los niveles obtenidos en el segundo paso para producir los pesos compuestos. Esto se hace por medio de una sucesión de multiplicaciones de matrices de pesos relativos en cada nivel de la jerarquía. La sucesión se da cuando la matriz de pesos relativa del segundo nivel se multiplica por la matriz de pesos relativa del tercer nivel, y entonces esta matriz resultante se multiplica por la matriz de pesos relativa para el nivel próximo. Este proceso se continua desde el segundo nivel hasta el más bajo, mientras se va formando un vector de pesos compuestos (la meta, el nivel más alto, no tiene ninguna matriz asociada con ella). El vector de pesos compuestos tiene una dimensión de 1 por  $m$  (donde  $m$  es el número de alternativas de decisión en el nivel más bajo de la jerarquía). Los pesos compuestos representan clasificaciones de alternativas con respecto a la meta global. Los pesos, también llamados valores de alternativas de decisión, son la base

donde se pueden tomar las decisiones. Éstos sirven como valores de efectividad de cada alternativa para alcanzar la meta. El valor global,  $R_i$ , de la  $i$ -ésima alternativa es la suma total de estos valores en cada uno de los niveles y se calcula de la manera siguiente:

$$R_i = \sum_k w_k r_{ik} \quad \text{Ecuación (2)}$$

Donde el  $w_k$  es el vector de prioridades asociado con el elemento  $k$ -ésimo de la estructura jerárquica de los criterios,  $\sum w_k=1$ ; y el  $r_{ik}$  es el vector de prioridades derivado de comparar las alternativas en cada criterio. La alternativa preferida es seleccionada identificando el valor máximo de  $R_i$ , ( $i = 1, 2, \dots, m$ ).

### 1.3.7. Lógica de transición gradual (Fuzzy)

La teoría de los conjuntos fuzzy es una generalización del álgebra booleana para situaciones donde las zonas de transición gradual son usadas para dividir clases, en vez de los límites bien definidos convencionales (Burrough, 1989).

La teoría matemática de la Lógica Fuzzy fue propuesta por Zadeh (1965). Es una teoría multivaluada donde hay valores intermedios tales como "moderado", "alto", "bajo" en vez de sí o no, verdadero o falso que es la teoría de límites bien definidos convencional. Mediante la Lógica Fuzzy un problema puede ser representado en términos de conjuntos con límites de transición gradual los cuales pueden derivarse de procedimientos cuantitativos o cualitativos (Prakash, 1996; Van Ranst *et al.*, 1996).

Por ejemplo, los criterios suelo y clima utilizados en la definición de la aptitud de tierra son de naturaleza continua. Dada la variación de este tipo de fenómenos geográficos, Burrough y McDonnell (1998) sugieren que el enfoque de pertenencia fuzzy es apropiado para definir los límites entre diferentes clases de aptitud para el uso de la tierra. Por lo anterior, en este trabajo se utilizó la Lógica Fuzzy para estandarizar los criterios de evaluación ya que es un método flexible que permite estandarizar tanto los mapas continuos (altitud y pendiente) como los mapas provenientes de información categórica (precipitación, temperatura, profundidad, textura y profundidad del suelo), generando mapas de criterio que

representaran la transición que se presenta en el mundo real. Aunque el enfoque de Lógica Fuzzy para la definición de la aptitud de la tierra trabaja con modelos, a demostrado que tiene menos limitaciones que las técnicas convencionales, las principal dificultad asociada con aplicar la Lógica Fuzzy es definir el método para crear la función de pertenencia (Burrough, 1989).

Burrough (1989) define matemáticamente la teoría de clasificación fuzzy como sigue:

$$A = \{x, \mu_A(x)\} \quad x \in X \quad \text{Ecuación (3)}$$

$A$  es la clase de los pares ordenados de objetos  $x$ , dentro del universo definido de objetos  $X$ , y su grado de pertenencia  $\mu_A(x)$  en  $A$ . Usualmente,  $\mu_A(x)$  es un número entre 0 y 1, donde 0 representa la no-pertenencia de clases y 1 representa la pertenencia completa, es decir, que si un elemento  $x$  realmente pertenece a  $A$ ,  $\mu_A(x) = 1$ , y si no pertenece es  $\mu_A(x) = 0$ . Entre más alto es el valor de  $\mu$ , mayor es la pertenencia de un elemento  $x$  a un sistema. Burrough (1989) enfatiza que el grado de pertenencia está reflejando la posibilidad de pertenecer a una clase y no cualquier tipo de probabilidad. McBratney & Odeh (1997) describen las tres formas básicas de funciones de pertenencia fuzzy llamadas triangular, trapezoidal y Gaussiana (Figura 1).

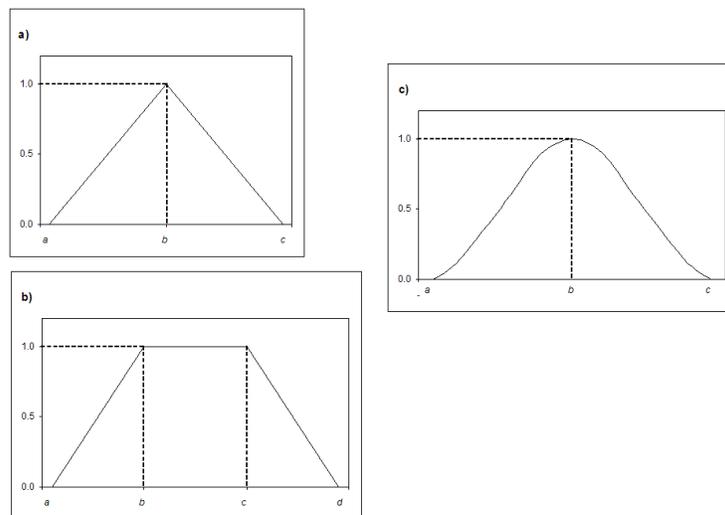


Figura 1. Formas básicas de funciones de pertenencia: triangular (a), trapezoidal (b) y Gaussiana (c) (McBratney y Odeh, 1997).

Van Ranst *et al.* (1996) señalan que las funciones de pertenencia pueden ser simétricas (Figura 1) o asimétricas (Figura 2).

García *et al.* (2004) demuestran las ventajas de la aplicación del enfoque de límites de transición gradual (fuzzy) con respecto a los métodos Booleanos convencionales, en la clasificación de la aptitud de la tierra para especies no agrícolas que carecen de datos de productividad. Estos autores explican que un conjunto fuzzy consiste en objetos y su respectivo grado de pertenencia en el conjunto. Si  $U$  es un conjunto de objetos denominado universo, el elemento genérico de  $U$  es denotado por  $u$ . Un subconjunto fuzzy  $F$  de  $U$  es caracterizado por una “función de membresía”  $\mu_f(u)$  ( $U$  toma valores de 0 a 1), la cual asocia cada elemento  $u$  de  $U$  a un número  $\mu_f(u)$  que representa el grado de asociación de  $u$  en  $F$ . De acuerdo a esta notación:

$$F = \int \mu_f(u) / u \text{ para variables continuas} \quad \text{Ecuación (4)}$$

$$F = \sum_{i=1}^n \mu_f(u_i) / u_i \text{ para variables discretas} \quad \text{Ecuación (5)}$$

El símbolo  $\int$  no es una integral Rieman, sino que se utiliza para indicar que la operación dentro del signo debe llevarse a cabo con todos los puntos dentro del rango. El símbolo / significa "con respecto a". Los valores de membresía siempre son positivos. Un conjunto fuzzy es normal cuando el valor de membresía más alto es la unidad, de otra manera es subnormal. Un conjunto subnormal puede ser normalizado dividiéndolo entre el valor de membresía más alto.

Por ejemplo, la definición de los requerimientos de precipitación de *E. grandis*: “para satisfacer las necesidades de humedad de *E. grandis* la precipitación anual optima debe ser entre 1000 y 1500 mm, y puede llegar a un desarrollo regular en precipitaciones de hasta 750 mm y no deben exceder precipitaciones de 4000 mm”. Para determinar las áreas con aptitud para esta especie de acuerdo a la precipitación acumulada anual, el conjunto fuzzy “precipitación suficiente” (Ps) es definido de la siguiente manera.

Ps=(0/700+0.1/730+0.2/760+0.3/790+0.4/820+0.5/850+0.6/880+0.7/910+0.8/940+0.9/970  
 +1/1000+1/1500+0.9/1750+0.8/2000+0.7/2250+0.6/2500+0.5/2750+0.4/3000+0.3/3250+0.  
 2/3500+0.1/3750+0/4000).

Este conjunto consiste de los valores de precipitación acumulada anual desde 700 hasta 4000 mm y su correspondiente grado de pertenencia. En la Figura 2 se representa gráficamente dicha función de pertenencia.

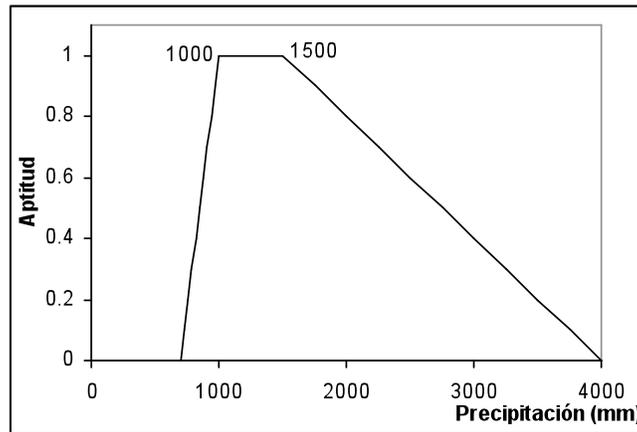


Figura 2. Función de pertenencia para el criterio precipitación anual de la especie *E. grandis*

Burrough (1989) describe las operaciones básicas en las clases fuzzy, los cuales son generalizados de las operaciones básicas de las clases booleanas. La intersección de dos clases fuzzy es denotada por  $A \cap B$  y es definida de la siguiente manera:

$$A \cap B = \int_X \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) / x \quad \text{Ecuación (7)}$$

El símbolo / significa “con respecto a”, y el símbolo  $\int$  no representa una integral Riemann, es una forma de expresar que la operación es hecha en todos los objetos  $x$  dentro del universo de objetos  $X$ . El operador  $\wedge$  simboliza “mínimo”. La intersección corresponde al operador ‘AND’ Booleano. La unión de dos conjuntos  $A$  y  $B$  es denotada por  $A \cup B$  y definida de la siguiente manera:

$$A \cup B = \int_X \mu_A(x) \vee \mu_B(x) / x \quad \text{Ecuación (8)}$$

El operador  $\vee$  simboliza “máximo”. La unión corresponde a el conectivo ‘OR’el cual es también un operador Booleano.

El complemento de una clase fuzzy  $A$  es denotada por  $\bar{A}$  la cual corresponde al operador ‘NOT’ Booleano y es definida de la siguiente forma:

$$\bar{A} = \int_x (1 - \mu_A(x)) / x \quad \text{Ecuación (9)}$$

### **1.3.8. Productividad forestal y su evaluación a partir del índice de sitio (IS)**

La altura que alcanzan los árboles dominantes de un sitio forestal a una edad determinada, llamada edad base, se le denomina Índice de Sitio (Clutter *et al.*, 1983). Tradicionalmente el Índice de sitio ha sido considerado el principal criterio a través del cual se clasifica la productividad. Bajo este concepto se asume que los sitios más productivos para una especie dada podrían producir a cierta edad base, árboles de mayores dimensiones que los sitios menos productivos (Mendoza, 1993).

La implementación de proyectos de plantaciones forestales exitosas requiere de la selección de sitios adecuados para la especie de interés (Pritchett, 1986). Desafortunadamente, para evaluar la productividad del sitio en base a los conceptos vertidos anteriormente es necesaria la presencia de arbolado en el sitio. Sin embargo es posible relacionar el IS con otras variables como las propiedades del suelo y de esta manera pronosticar la productividad de áreas sin presencia de arbolado (Carmean, 1975).

Evaluar la productividad del suelo es útil para conocer apropiadamente el potencial de cada sitio y planear actividades silvícolas sustentables (Mckenney and Pedlar, 2003). Los estudios de productividad en plantaciones forestales son también importantes cuando se establecen en áreas deforestadas ya que contribuye en el secuestro de carbono transfiriendo CO<sub>2</sub> atmosférico a la planta y al sistema del suelo (Zinn *et al.*, 2002; Forrester *et al.*, 2006; Lima *et al.*, 2006).

## **CAPÍTULO II. APTITUD DE ÁREAS PARA PLANTACIONES COMERCIALES DE EUCALIPTO EN OAXACA Y VERACRUZ**

### **2.1. RESUMEN**

Este estudio reporta una zonificación de áreas con aptitud para el establecimiento de plantaciones forestales comerciales de *Eucalyptus grandis* y *E. urophylla* en los límites de Oaxaca y Veracruz. Se utilizó el Proceso de Análisis Jerarquizado (AHP) en un ambiente de sistemas de información geográfica para identificar diferentes niveles de aptitud. Los criterios de evaluación fueron seleccionados con base en la influencia de los factores ecológicos sobre el desarrollo de las especies y la disponibilidad cartográfica. Se utilizaron variables discretas (precipitación y temperatura; profundidad, textura y pH del suelo) y variables continuas (altitud y pendiente). La estandarización de los criterios (variables) se realizó a través de técnicas de transición gradual (fuzzy). La importancia relativa de los criterios (pesos) considerados fue calculada de opiniones de expertos. Los resultados indican que el área estudiada tiene un gran potencial para el establecimiento de estas especies. Más del 50% de ésta es muy apta para establecer *E. urophylla*, mientras que para *E. grandis* la aptitud se distribuye en 25% alta, 25% media y 50% baja.

### **2.2. SUMMARY**

This study reports a land suitability zoning for the establishment of commercial forest plantations of *Eucalyptus grandis* and *E. urophylla* in the limits of Oaxaca and Veracruz. The AHP technique was implemented in a SIG environment to identify land suitability levels. The evaluation criteria were selected with base on the influence (weight) of the ecological requirements of the species and the cartographic information availability. Discreet and continuous variables such as precipitation, temperature; soil depth, soil texture, soil pH and altitude and slope, respectively were used. All criteria (variables) were standardized using Fuzzy logic membership functions. The relative importance of the criteria (weights) was calculated from expert's opinions. Results indicate that the studied area has a great potential for the establishment of plantations with the species considered. More than 50% of the area is very suitable to establish *E. urophylla*, whereas for *E. grandis* the suitability is distributed as follows: 25% high, 25% medium and 50% low.

### 2.3. INTRODUCCIÓN

La zonificación de áreas aptas para el establecimiento de Plantaciones Forestales Comerciales (PFC) de una especie en particular es un aspecto importante a considerar, ya que las consecuencias sociales y económicas derivadas de seleccionar sitios inadecuados de plantación pueden resultar inaceptables para la sociedad e inversionistas del ramo. En México, la mayoría de los estudios de aptitud se realizan mediante técnicas cartográficas simples (álgebra booleana), consistiendo básicamente en sobreponer capas de información espacial (mapas temáticos) que representan las características biofísicas del área y que representan los requerimientos climáticos, edáficos, entre otros, de la especie de interés; asumiendo que influyen de la misma manera en la producción (Flores y Moreno, 1994; Moreno *et al.*, 1994; Baca, 1998; Meza, 2001 y 2003; Barcenas, 2002; Rivera, 2003). Bajo este método se clasifican como áreas potenciales aquellas superficies que poseen las características consideradas como óptimas para el desarrollo de una especie en particular. A pesar de que este método permite definir áreas con aptitud, tiene la desventaja de no discriminar o identificar los diferentes niveles de aptitud o productividad espacial en el área de interés.

Es de suponer que en una situación real no todos los criterios influyen de igual manera en el éxito y productividad de una plantación, por el contrario, es probable que todos contribuyan en diferente grado. Una alternativa metodológica para la realización de este tipo de estudios, que incorpora factores de ponderación para cada criterio considerado, es el Análisis de Evaluación Multicriterio, el cual tiene como propósito investigar un número de alternativas mediante criterios múltiples y objetivos en conflicto con la finalidad de auxiliar a los tomadores de decisiones a describir, evaluar, ordenar, jerarquizar, seleccionar o rechazar alternativas de uso (Malczewski, 1999), o como en el caso que nos ocupa, para identificar los diferentes grados de aptitud de un área para un fin específico. Los grados relativos de contribución se analizaron comparando el método Booleano y el Proceso de Análisis Jerárquico (AHP), adicionando técnicas Fuzzy (efectos confundidos).

El estudio se realizó en cinco municipios del noreste del estado de Oaxaca y siete municipios del sureste de Veracruz. Su implementación responde a una necesidad de la empresa Plantaciones de Tehuantepec S.A. de C.V. (PLANTEH), la cual está desarrollando un Proyecto de PFC de *Eucalyptus grandis* y *E. urophylla*, para la producción de materias primas celulósicas y maderables.

Aunque es conocido que esta región posee condiciones ecológicas apropiadas para el desarrollo de PFC, la localización de los mejores lugares para el establecimiento de plantaciones es una estrategia para dirigir la contratación de terrenos y aumente la posibilidad de éxito en las plantaciones, que permita incrementar los beneficios económicos y disminuya los riesgos del propietario.

## **2.4. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.4.1. Localización y descripción del área de estudio**

El presente estudio fue desarrollado en los terrenos plantados por la empresa PLANTEH y una zona circundante (área de influencia) de 8,622 km<sup>2</sup> ubicada entre las coordenadas 17°42' y 17°24' de LN y los 95°30' y 95°17' de LO. Comprende los municipios San Juan Guichicovi, Santiago Yaveo, San Juan Cotzocón, San Juan Mazatlán y Matías Romero del Estado de Oaxaca; y los municipios Playa Vicente, Juan Rodríguez Clara, Santiago Sochiapan, San Juan Evangelista, Sayula de Alemán, Texistepec y Jesús Carranza del Estado de Veracruz (Figura 3).

El área plantada por PLANTEH al 2007 es de 2,527 ha, distribuidas en 17 predios, con edades de hasta 8 años, de un proyecto que considera desarrollar plantaciones en 20,624 ha.

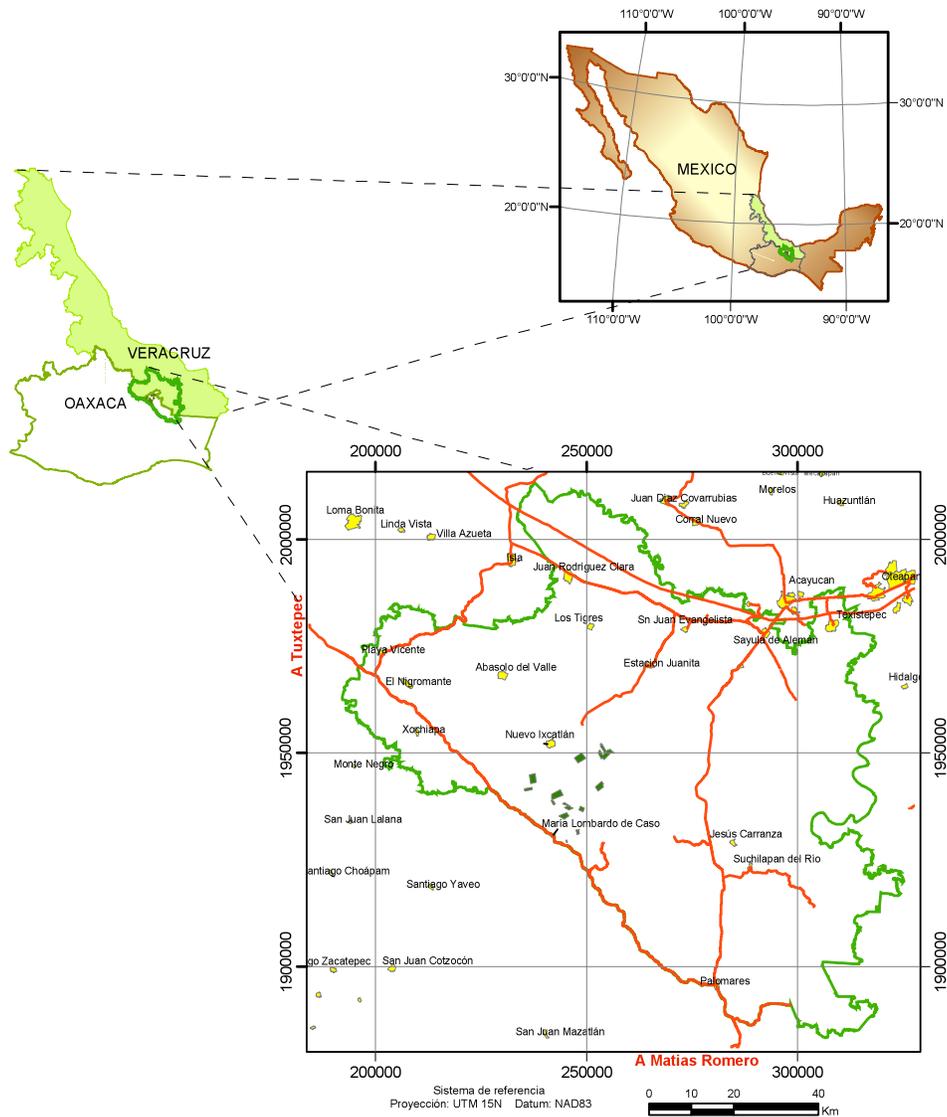


Figura 3. Localización del área de estudio.

## Clima

El clima predominantemente en la región es del tipo cálido húmedo (Am) y cálido subhúmedo (Aw). La temperatura promedio anual es de 24 a 28°C. La temperatura mínima varía de 14 a 20°C. La precipitación media anual va de los 2000 a los 3000 mm en el (Am) y de 800 a 2000 mm en el (Aw). Las condiciones climáticas son ideales para el cultivo de árboles. La altura sobre el nivel del mar varía de 0 a 400 m (CONABIO, 1998).

## **Suelos**

Las unidades de suelo principales en la región son los Cambisoles, Acrisoles, Luvisoles, Gleysoles y Regosoles. En general estos suelos son de textura franca o arcillosa con profundidad variable. El pH varía de 3.5 a 7.3 en los terrenos plantados.

## **Fisiografía**

La región donde se desarrolla el proyecto se conforma por planicies y lomeríos en su mayoría, con pendientes que no rebasan el 35%. En donde hay posibilidades de extender las plantaciones hay tierras con pendientes planas. Los terrenos con pendientes fuertes y alrededor de los ríos se dejan sin plantar, facilitando las condiciones para la extracción de madera.

Las plantaciones se han desempeñado bien hasta una altitud de 1,200 m y una latitud de 27° Sur, con un incremento en el límite de la altitud de 50 m por cada grado que la latitud decrece, o una reducción similar por cada grado en que la latitud aumenta (Schönau *et al.*, 1984).

## **Hidrología.**

El área de estudio está localizada dentro de las cuencas de los ríos Papaloapan y Coatzacoalcos, encontrándose dos ríos, el Río Trinidad que se extiende por la parte central del área y el río Coatzacoalcos que escurre por el sureste del área.

### **2.4.2. Requerimientos ecológicos de *Eucalyptus grandis***

## **Clima**

*E. grandis* obtiene su mejor desarrollo en climas húmedos subtropicales o templados cálidos con lluvia concentrada en el verano, pero ha sido plantada con buenos resultados en áreas con una amplia gama de rangos en la estación seca. Si bien la precipitación mínima queda afectada por otros factores, tales como la evapotranspiración y el tipo de suelo, algunos autores especifican un mínimo de 750 mm (FAO, 1981; Booth *et al.*, 1988; Booth

y Pryor, 1991) para la especie y una máxima de 4000 mm, siendo preferible el intervalo de los 1000 a los 1500 mm para su mejor crecimiento (FAO, 2000).

El intervalo óptimo de temperatura media anual oscila entre los 24 y 25°C. La experiencia en África indica que la temperatura media del mes más frío no debe ser menor a 7° C y la temperatura mínima diaria no menor de 5° C para el crecimiento óptimo de esta especie (Schönau *et al.*, 1984), la temperatura máxima promedio aceptable para la especie varía de 30° a 35°C (FAO, 2000).

### **Suelo**

En general requiere suelos profundos, mayores de un metro, pero puede crecer bien en suelos con profundidades de 50 a 100 cm, en texturas franco-arcillosas con buen drenaje. Es posible obtener buenos resultados sobre suelos con texturas más gruesas, pero se considera deseable la profundidad de dos metros (FAO, 1981). El pH óptimo varía de 5.5 a 6.5 y no debe ser menor de 5 ni mayor de 7.5.

### **Topografía**

El mejor desempeño de las plantaciones se da en una altitud de 0 a 600 m y con un límite máximo de hasta 2,700 m (FAO, 2000). Los lugares óptimos son tierras planas y pendientes inferiores de los valles menores al 35 por ciento (FAO, 1981).

#### **2.4.3. Requerimientos ecológicos de *Eucalyptus urophylla***

### **Clima**

*E. urophylla* promete mucho en áreas húmedas o subhúmedas, tropicales o subtropicales. Las plantaciones se desarrollan mejor en áreas con un rango de precipitación media anual entre 1,300 y 2,500 mm y una estación seca de 1 a 5 meses en la época más fría del año. Éstas pueden llegar a tener un desarrollo regular con precipitaciones medias de hasta 700 mm y en un máximo de 4,000 mm. La temperatura media anual óptima varía de 24 a 35° C,

la temperatura media óptima del más frío es de 10°, sin bajar de los 5° y las temperaturas de mes más caliente varían de 32 a 35° C (FAO, 1981; FAO, 2000 ).

### **Suelo**

Su mejor crecimiento se da en suelos húmedos y bien drenados con profundidad mayor a un metro, pero puede crecer bien en suelos con profundidades de 50 a 100 cm. La textura óptima para el buen desarrollo de las plantaciones es la media fina, aunque también pueden desarrollarse en texturas más gruesas con crecimientos menores. El pH óptimo debe estar entre 5.5 y 6.5 y no debe ser menor de 5 ni mayor de 7.5. (FAO, 1981; FAO, 2000).

### **Topografía**

El mejor desempeño de las plantaciones se da en altitudes de 500 a 1,400 m (FAO, 1981), pero pueden funcionar en altitudes de 0 a 2,700 m (FAO, 2000). Los lugares óptimos son tierras planas y pendientes inferiores de los valles menores al 30 por ciento (FAO, 1981).

#### **2.4.4. Criterios para identificar las áreas aptas a plantar**

La identificación de las áreas aptas para el establecimiento de plantaciones de eucalipto tiene su base en los requerimientos ecológicos de las especies bajo estudio (denominados criterios en el argot de la evaluación multicriterio), los cuales se dividen en tres principales: clima, suelo y topografía; mismos que a su vez se dividen en subcriterios. Estos criterios o factores no son los únicos que influyen en el éxito de las plantaciones de eucalipto, pero si son los más relevantes en opinión de expertos, una revisión bibliográfica y condicionados por la disponibilidad cartográfica para el área de estudio. Los subcriterios más relevantes fueron: precipitación (FAO, 1958), temperatura media, máxima y mínima (Prado y Barros 1989; Spurr y Barnes, 1980), pH del suelo (Fassbender, 1985), textura (Pritchett, 1990), pendiente (Spurr y Barnes, 1980; Pritchett, 1990).

Una vez identificados los criterios y subcriterios se recopiló la información cartográfica y se homogeneizó en cuanto a la proyección y datum para poder realizar la modelación

cartográfica. Adicionalmente, a los criterios categóricos (vectoriales) se les asignó el valor medio de clase y se realizó una conversión de formato vectorial a raster con el modulo Spatial Analysis de Arc Map 8.1. (ESRI, 2001).

Bajo un enfoque de evaluación multicriterio espacial como la que se reporta, los criterios se representan mediante mapas (mapas criterio). Los utilizados se describen a continuación:

### **Precipitación**

Tomada de la carta de isoyetas de la CONABIO (1998), escala 1:250 000 la cual fue realizada tomando en cuenta el relieve, la dirección principal del viento y los efectos de barrera montañosa como son: el efecto de sombra pluviométrica, el de embalse y el descenso y ascenso orográfico. Asumiendo que la precipitación aumenta en proporción geométrica (Figura 4).

El rango de precipitación del área de estudio varía de los 800 a los 3000 mm, predominando precipitaciones altas de 1000 a 2500.

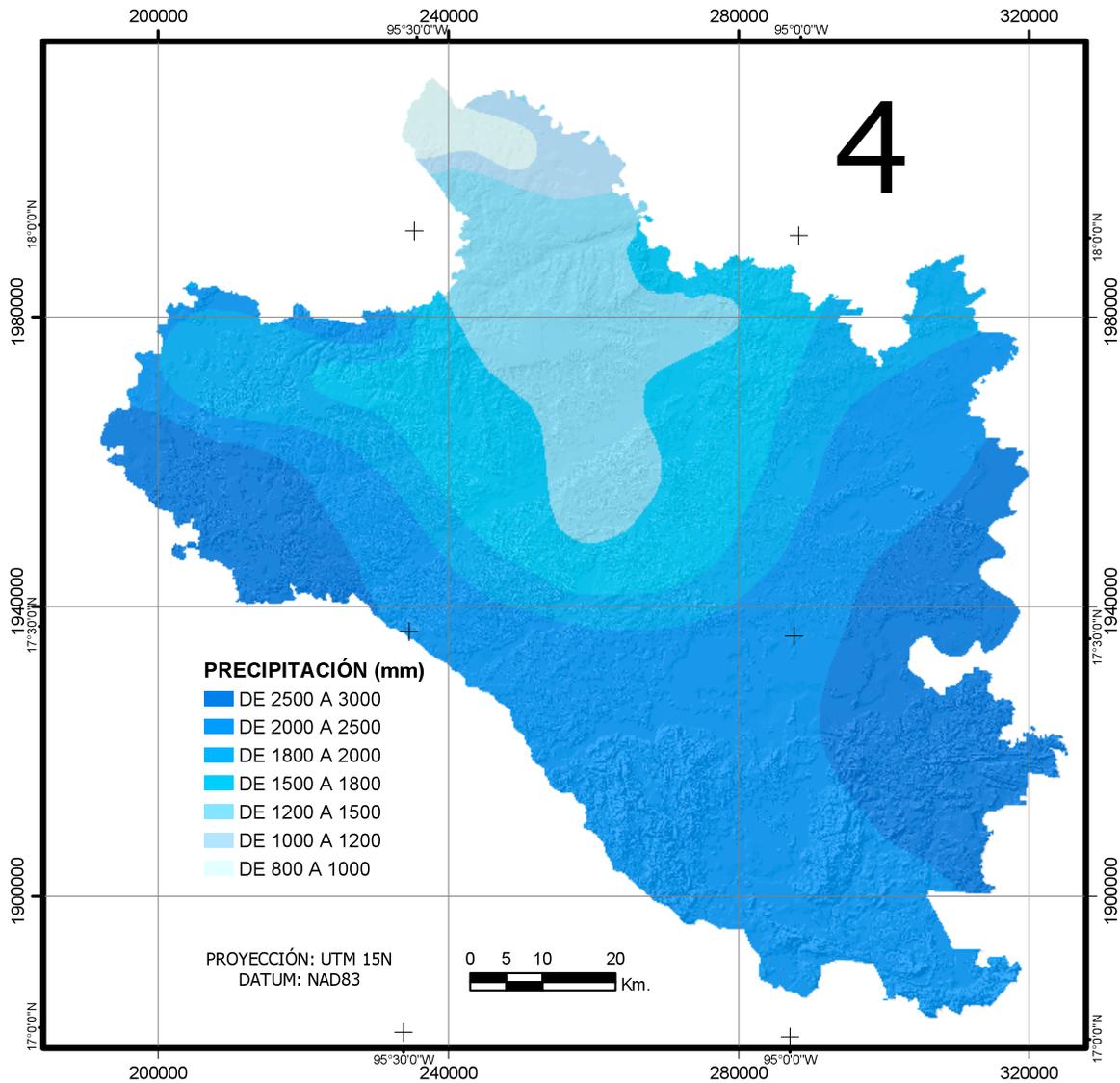


Figura 4. Precipitación del área de influencia del proyecto

## Temperatura

El mapa de temperatura media anual, temperaturas máximas y mínimas promedio se obtuvieron de la cartas temáticas escala 1:1000 000 de INEGI, en los cuales se calcularon gradientes térmicos según las diferentes vertientes de las sierras. La equidistancia de isotermas es cada dos grados (Figuras 5, 6 y 7). Debido a la homogeneidad topográfica del área de estudio se considera que aunque la escala de estos criterios es muy pequeña, es muy posible que los datos sean lo suficientemente precisos.

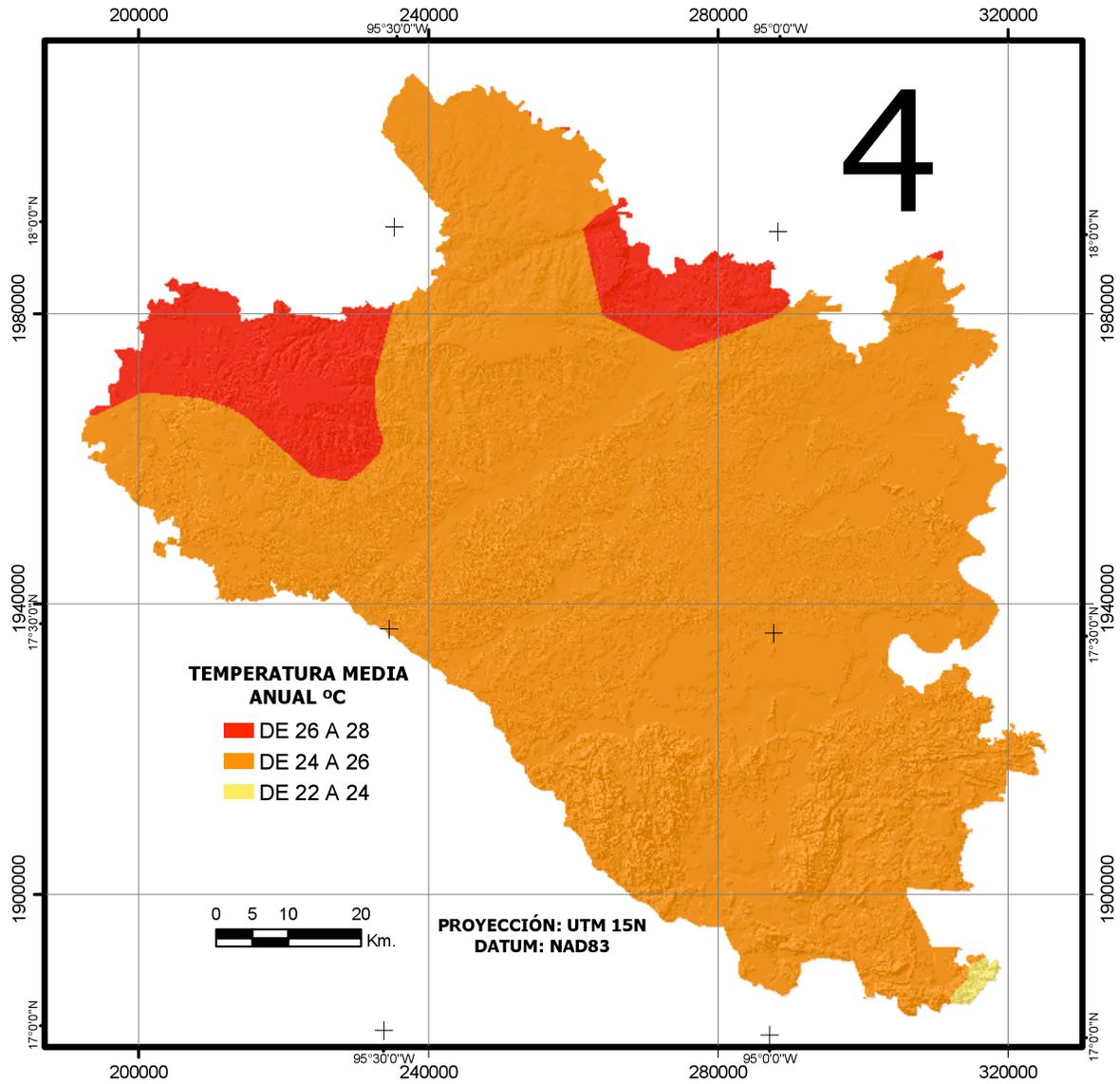


Figura 5. Temperatura media anual del área de influencia del proyecto.

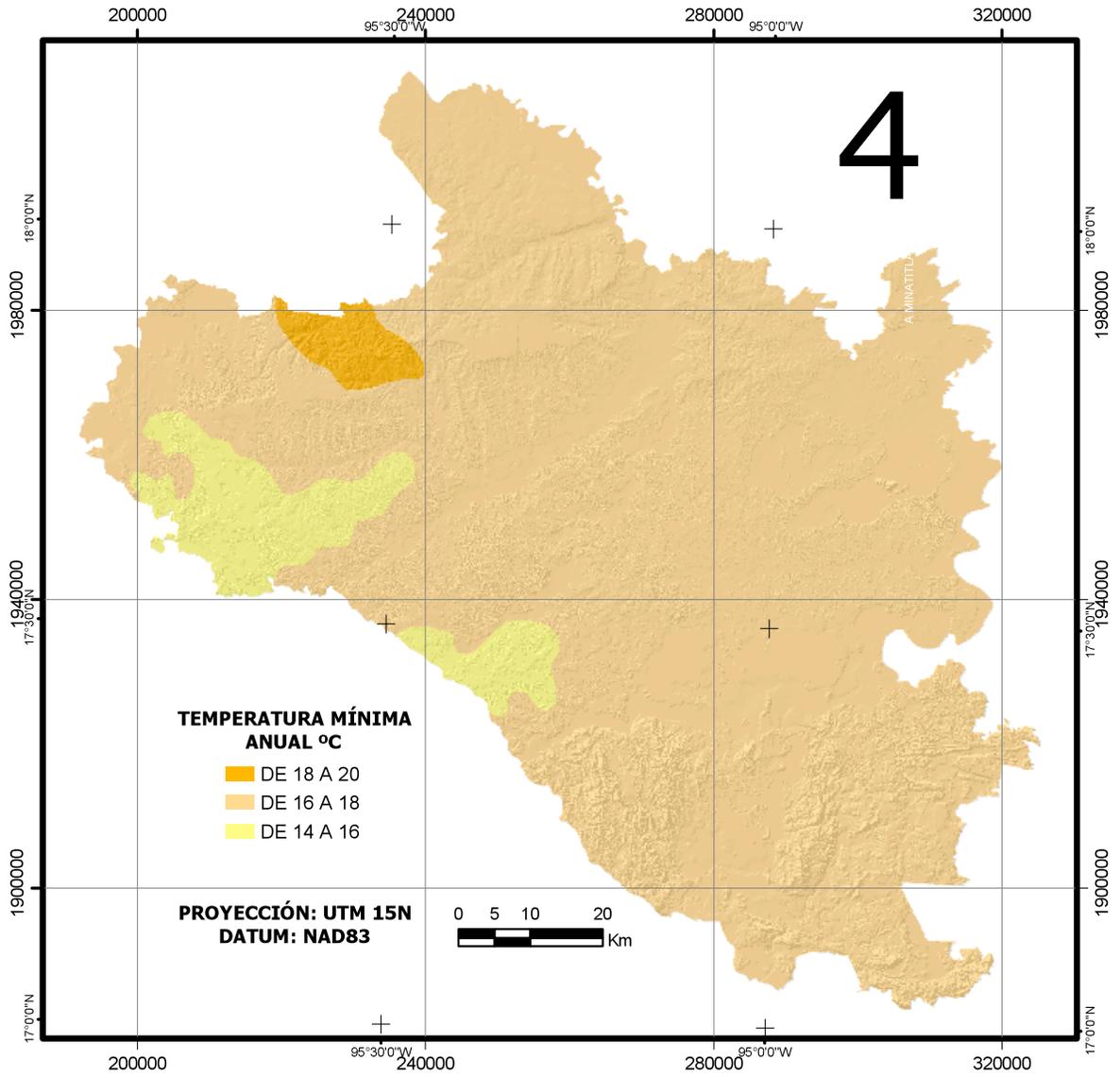


Figura 6. Temperaturas mínimas del área de influencia del proyecto.

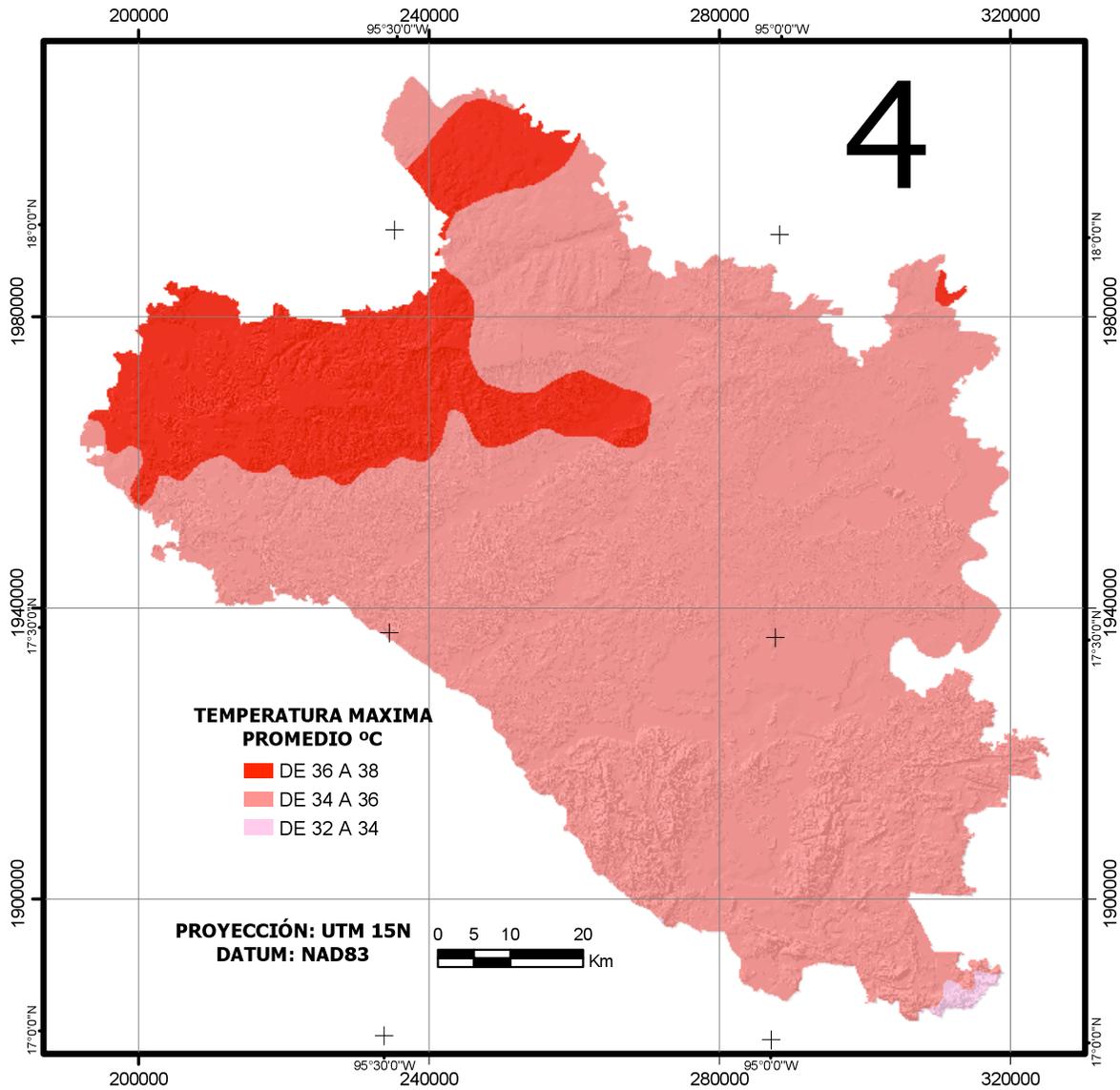


Figura 7. Temperaturas máximas del área de influencia del proyecto.

### Profundidad del suelo

Se obtuvo a partir de las fases físicas de la carta edafológica de la CONABIO (1998) generada con cartas 1:250,000 del INEGI (Figura 8). Las tres clases posibles de profundidades de suelo fueron de 0 a 50 cm (lítica, gravosa y pedregosa), de 50 a 100 cm (lítica profunda,) y >100 cm (suelos sin fase). A las dos primeras se le asignó el valor promedio de clase (25 y 75 respectivamente), y a los suelos sin fase física se les asignó un

valor de 100 por considerar que a partir de esta profundidad no existen restricciones para el óptimo desarrollo de la especie.

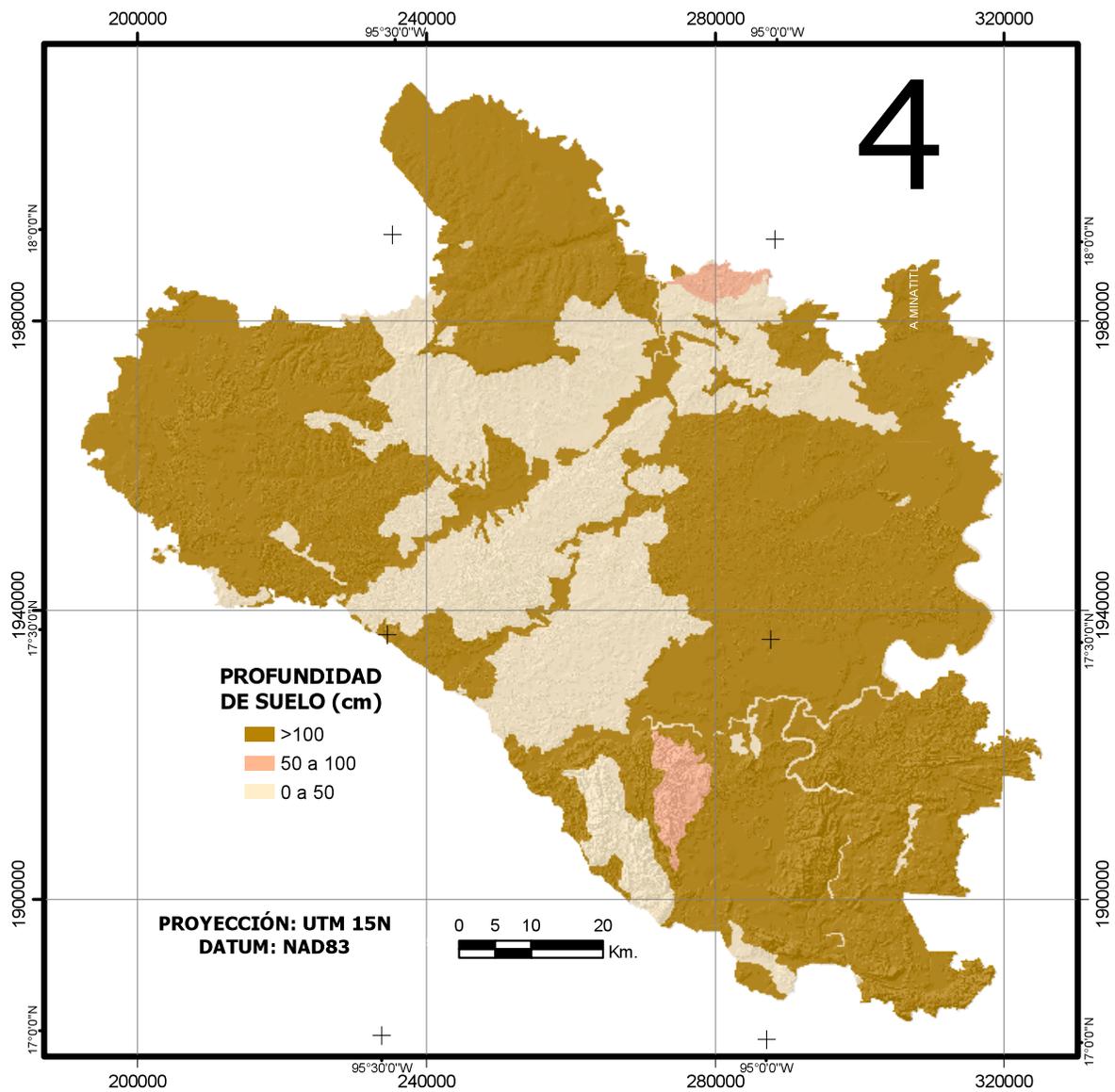


Figura 8. Profundidad del suelo del área de influencia del proyecto.

En su mayoría se presentan suelos con profundidad mayor a un metro, aunque buena parte de área presenta profundidades de 0 a 50 cm.

## Textura del suelo

También obtuvo de la carta edafológica de la CONABIO (1998), la cual presenta tres categorías: gruesa (suelos con mucha arena), media (suelos con equilibrio de arcilla, limo y arena) y fina (suelos con mucha arcilla) (Figura 9).

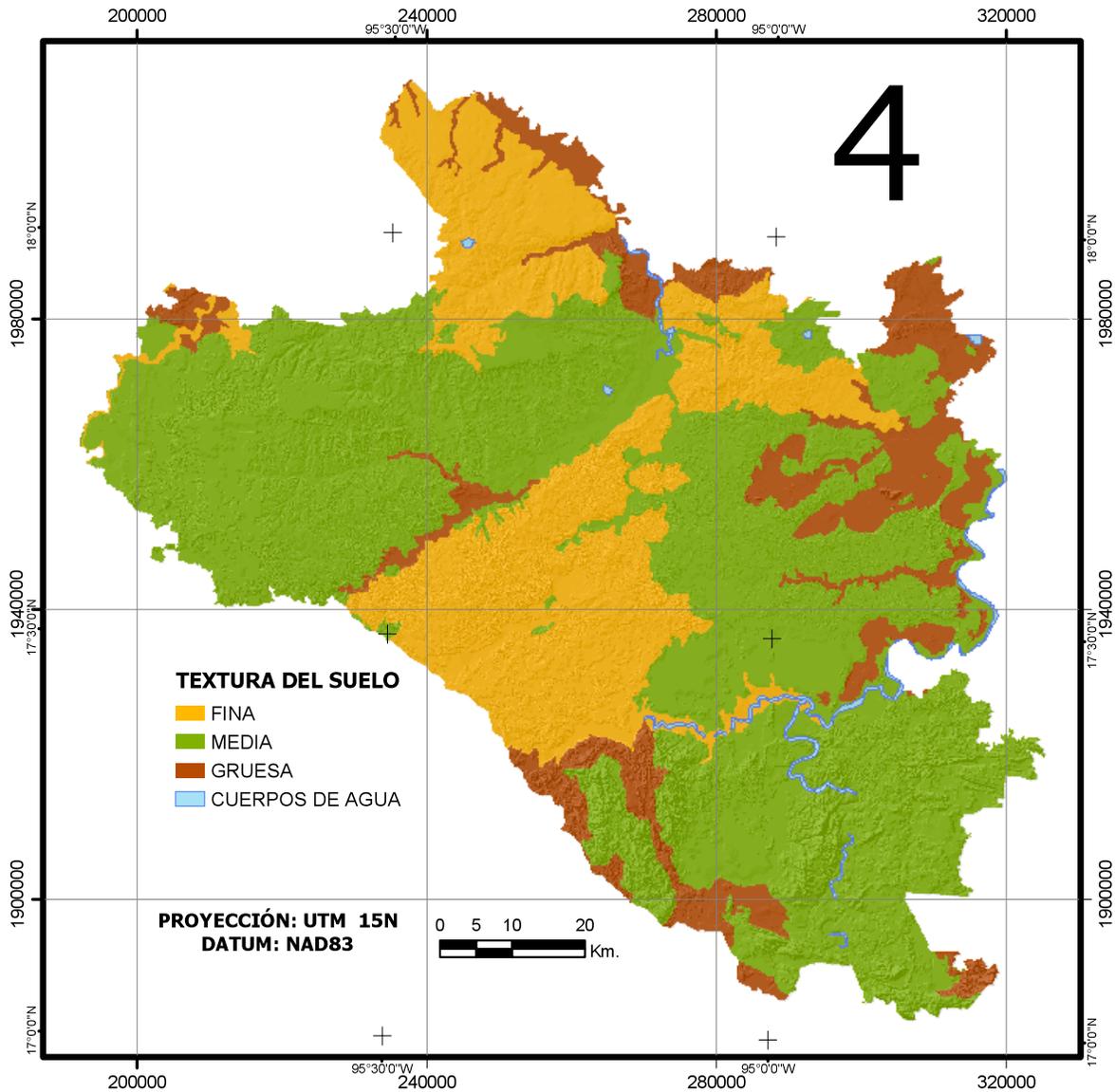


Figura 9. Textura del suelo del área de influencia del proyecto.

La textura dominante es la media, seguida de la fina y con menor distribución la textura gruesa.

## pH del suelo

Se obtuvo de la Memoria Nacional “Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana, escala 1:250,000” como parte de la actualización del Inventario Nacional Forestal y de Suelo 2000-2006, la información proviene de muestras de suelo de la capa superficial (0 a 20 cm); posteriormente mediante interpolación se generaron mapas de pH en formato raster (SEMARNAT, 2002). En el área de estudio se encuentran suelos ligeramente ácidos a neutros y ácidos, siendo este último el de mayor distribución (Figura 10).

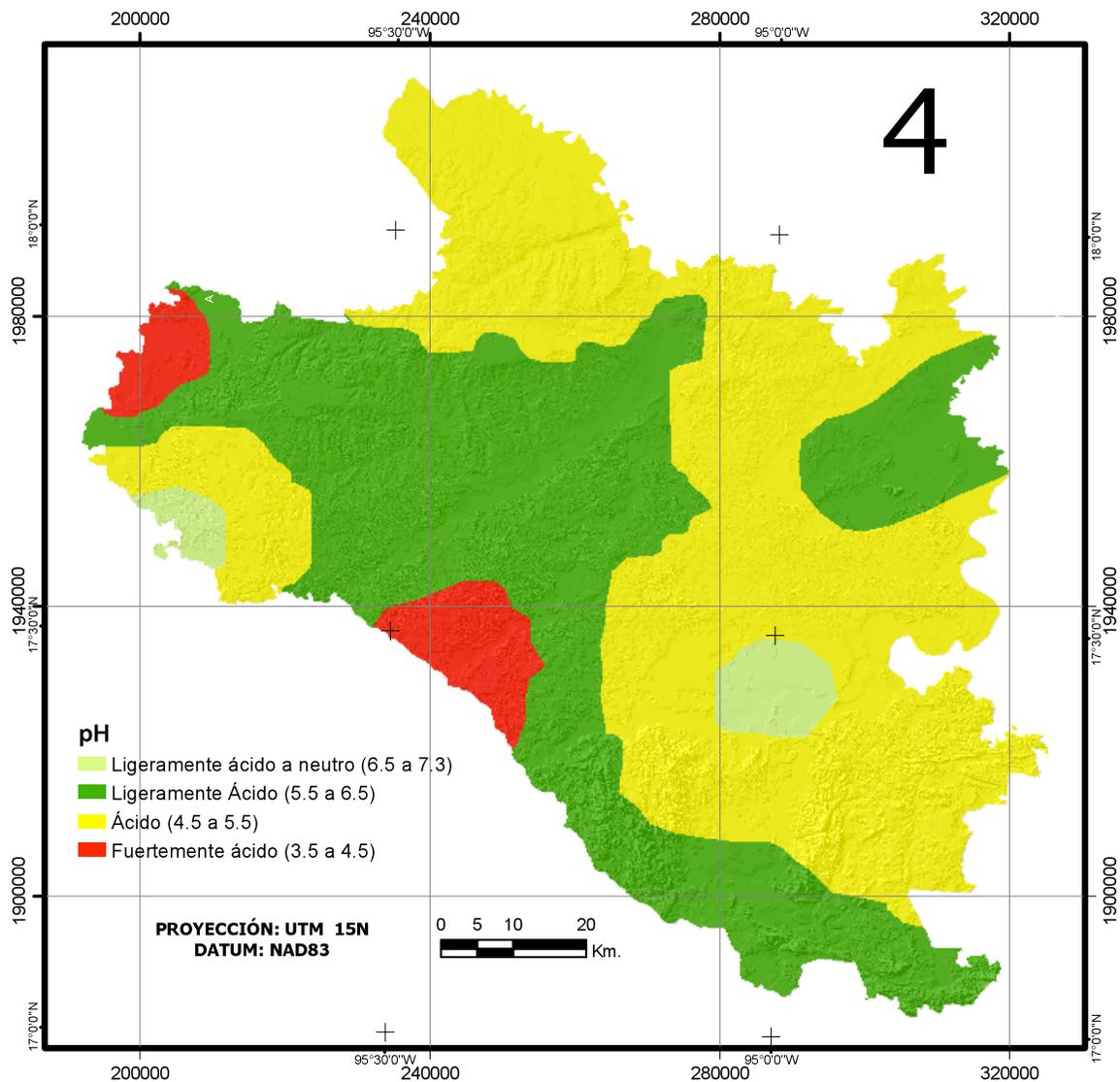


Figura 10. pH del suelo denle el área de influencia del proyecto.

## Altitud

Se obtuvo de los modelos de elevación digital “Continuo de Elevaciones Mexicano” (CEM) basado en la cartografía topográfica escala 1:50,000. Esta información se encuentra disponible como un producto raster y proporciona elevaciones del país en un continuo nacional, sin divisiones cartográficas (INEGI, 2005).

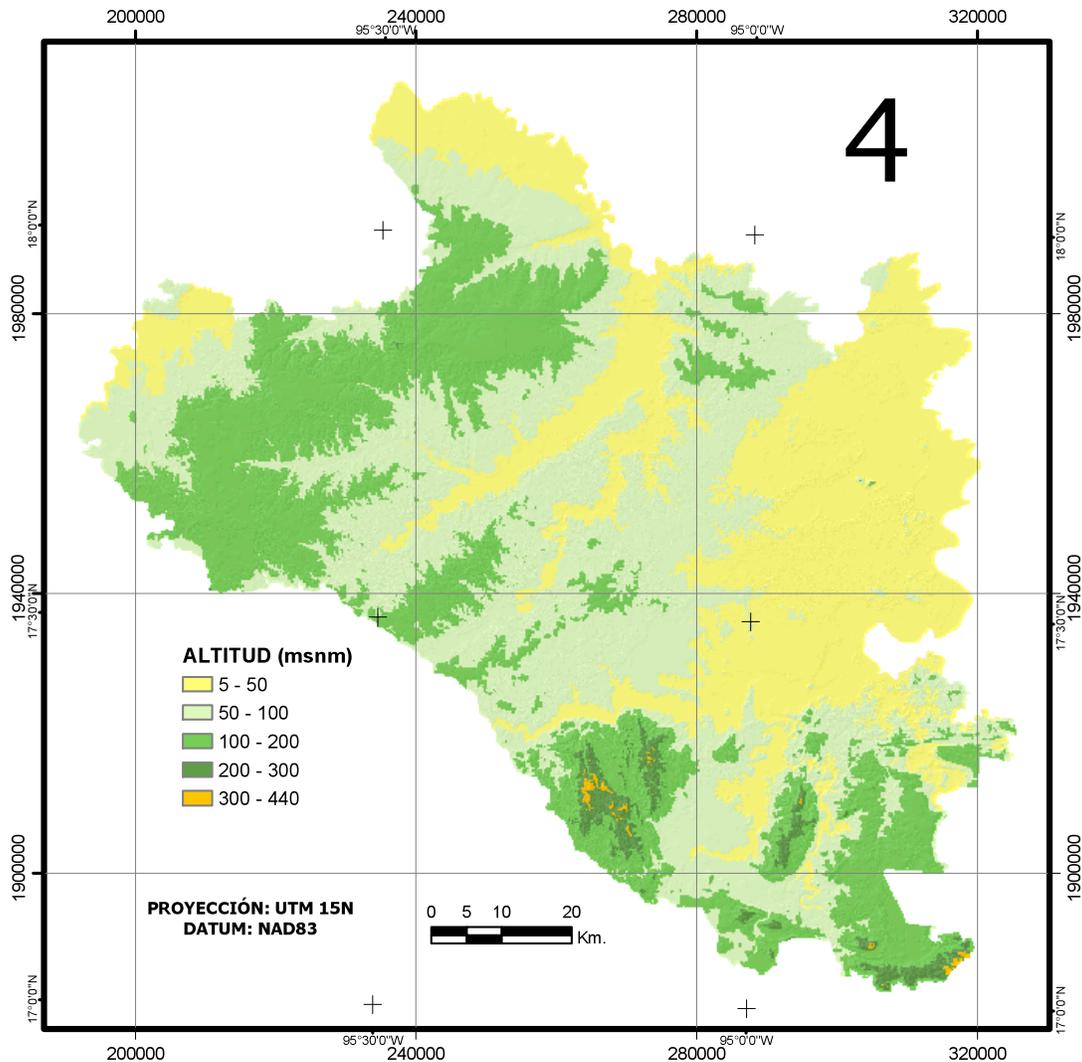


Figura 11. Altitud del área de influencia del proyecto.

Los puntos de muestreo se encuentran a 1x1 segundos de arco (tamaño de celda) y están ordenados por renglones de norte a sur y en sentido oeste a este. El sistema de alturas (Z) se encuentra en metros, se utiliza en datum ITRF92 y el elipsoide GRS 80 los cuales son compatibles con NAD83.

Como se ilustra en la Figura 11, la zona presenta altitudes bajas, llegando a un máximo de 400 m en áreas muy reducidas. La mayor parte del área presentan altitudes que están entre los 5 y los 100 m.

### Pendientes

Se generaron a partir de los modelos de elevación con el modulo "Spatial Analysis" del software ARC GIS 8. El área presenta pendientes menores a 30% casi en su totalidad y áreas pequeñas con pendientes de 35 a 100% (Figura 12).

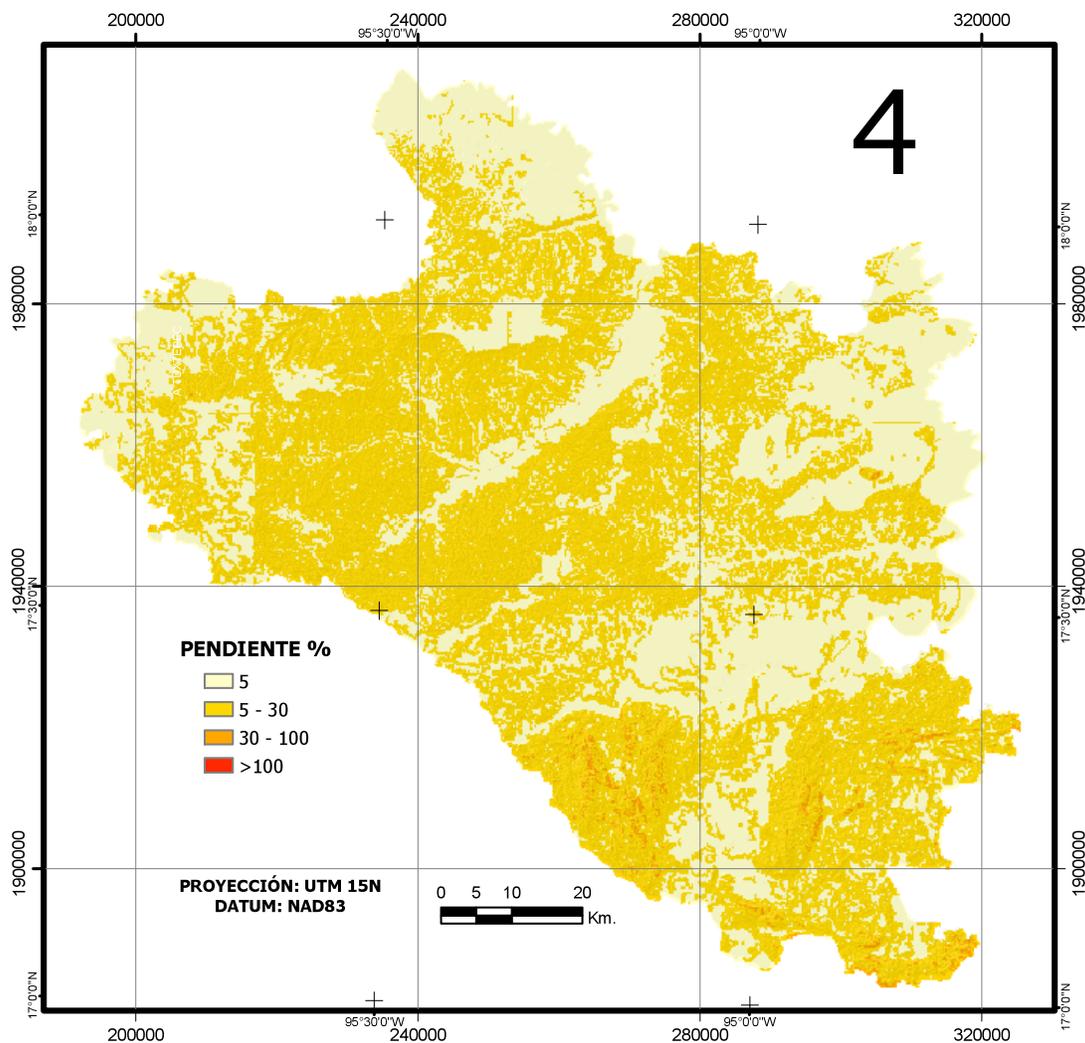


Figura 12. Pendientes del área de influencia del proyecto.

## 2.4.5. Restricciones para discriminar las áreas no aptas

Contrario a los criterios, una restricción es una condición o circunstancia que limita el desarrollo de la actividad de interés. Para discriminar del análisis las áreas no aptas debido a restricciones se generaron mapas-restricción elaborados a partir de los caminos, los cauces de ríos, los cuerpos de agua y las áreas con cubierta vegetal arbolada. A este tipo de áreas se les asignó un valor de 0 (restricción), al resto un valor 1, finalmente se hizo una intersección booleana para conjuntarlas en un mapa único (Figura 15).

### Caminos

Estos fueron digitalizados de la carta topográfica E15-7 escala 1:250 000, corroborados y detallados con imágenes Landsat de 2000 y 2001 descargadas del portal internet <http://glcf.umiacs.umd.edu/index.shtml> (Figura 13). El área a discriminar por caminos se estableció con una zona de amortiguamiento (buffer) de 50 m.

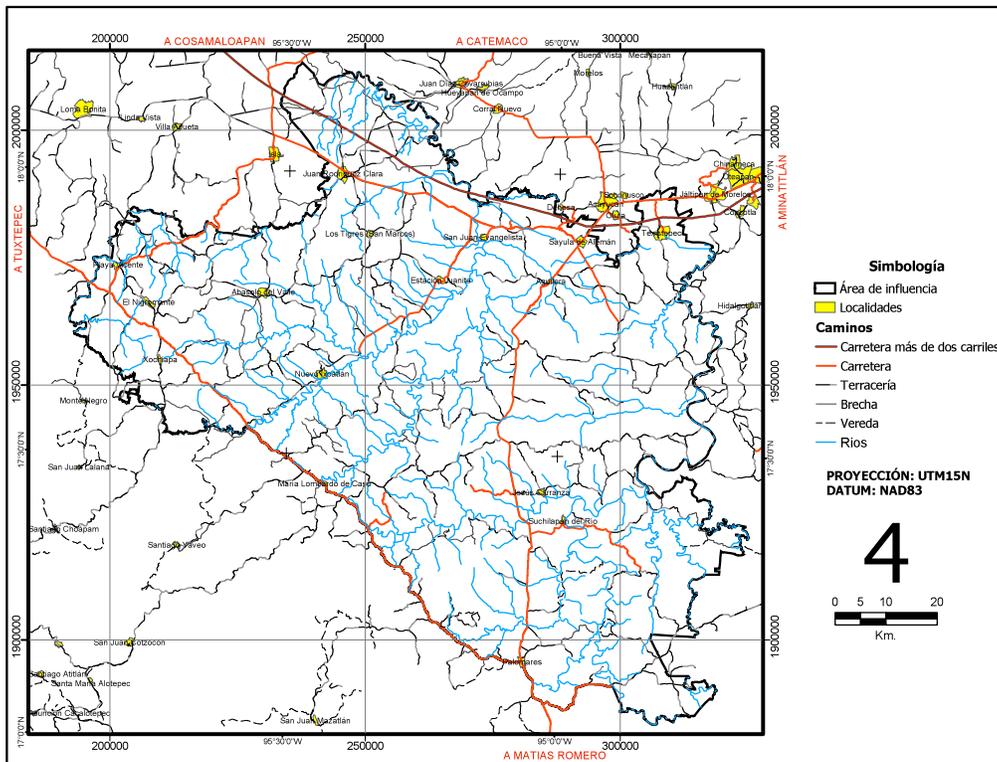


Figura 13. Vías de acceso del área de influencia del proyecto.

## Cauces

Al igual que los caminos estos fueron digitalizados de la carta topográfica E15-7 escala 1:250 000, y fueron corroborados y detallados con imágenes Landsat de 2000 y 2001 (Figura 13). Los ríos y arroyos presentes en el área fueron discriminados con un buffer de 100 m.

## Uso del suelo

El mapa de uso de suelo se obtuvo del Inventario Nacional Forestal escala 1:250 000 (SEMARNAP, 2000) uniendo las cartas Inv\_e157f, inv\_e1510f y inv\_e1514f (Figura 14).

Las áreas factibles identificadas y las no aptas se presentan en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Superficies de la vegetación y uso del suelo del área de influencia del estudio

<b>Criterio</b>	<b>Área</b>
Agricultura (Ag) de humedad*	9,189.86
Ag. de temporal con cultivos anuales**	80,126.33
Ag. de temporal con cultivos permanentes y semipermanentes**	27,456.94
Asentamiento humano*	6,594.78
Bosque de encino*	4,562.12
Bosque de encino con vegetación secundaria arbustiva y herbácea*	1,260.34
Cuerpo de agua*	2,697.43
Palmar*	1,367.39
Pastizal cultivado**	629,181.58
Pastizal inducido**	261.71
Popal-tular*	1,411.03
Selva alta y mediana perennifolia*	22,835.33
Selva alta y mediana perennifolia con vegetación secundaria arbustiva y herbácea *	74,440.74
Vegetación halófila y gipsófila*	885.53

\*No aptas, \*\* aptas para PFC

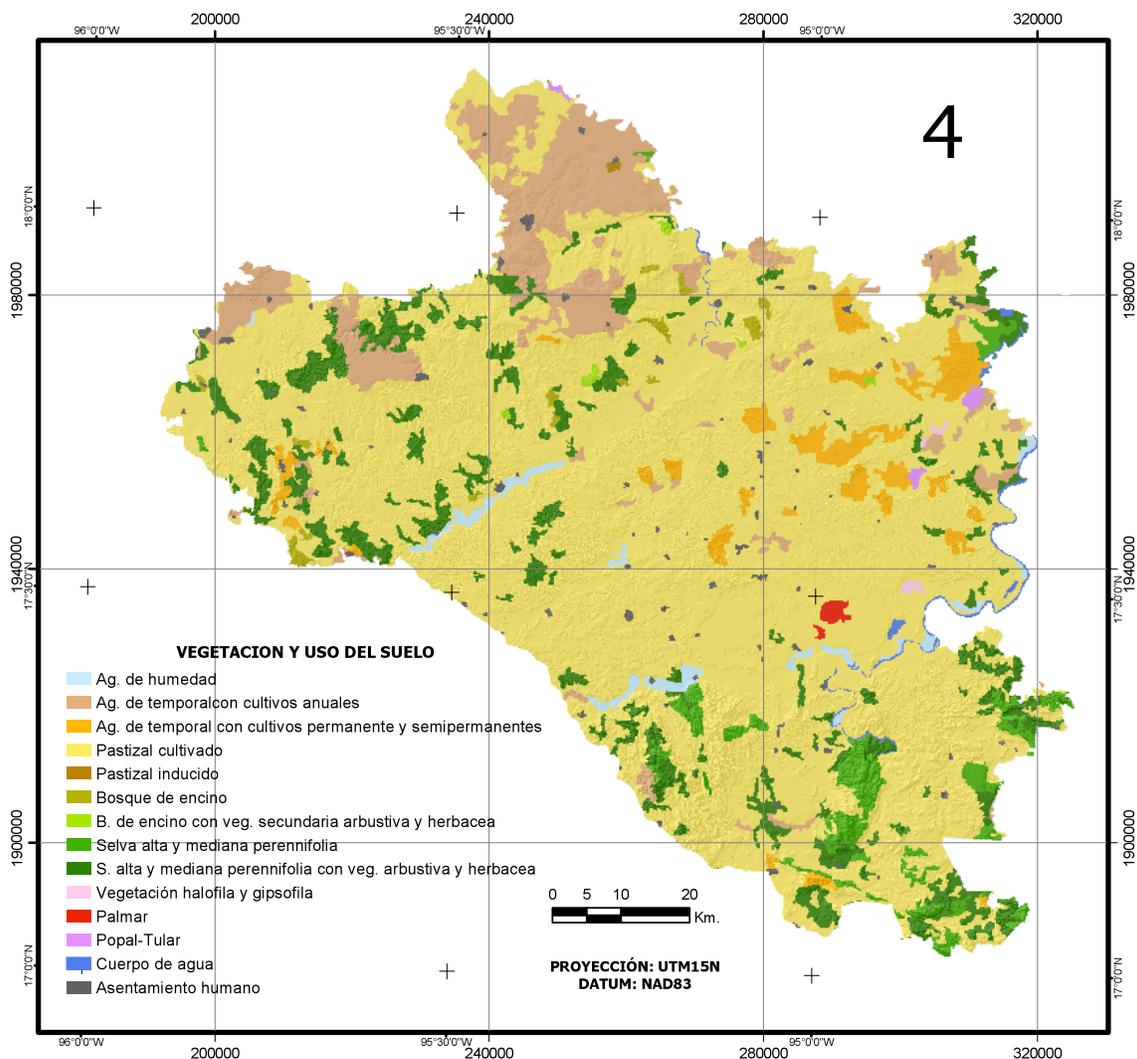


Figura 14. Vegetación y uso del suelo del área de influencia del proyecto.

### Pendientes

Se discriminaron las áreas con pendiente mayor de 30% debido a que es la pendiente máxima considerada para el uso de maquinaria (García *et al.*, 2001) lo cual favorece la productividad de las plantaciones forestales.

Para desplegar el conjunto de alternativas factibles estas coberturas se reclasificaron, a las áreas discriminadas (áreas no aptas) se les asignó el valor de 0 y al resto el valor 1, finalmente se hizo una intersección booleana. La Figura 15 muestra el área discriminadas y

el área factible; (las áreas de amortiguamiento para caminos y cauces no se aprecian debido a la escala).

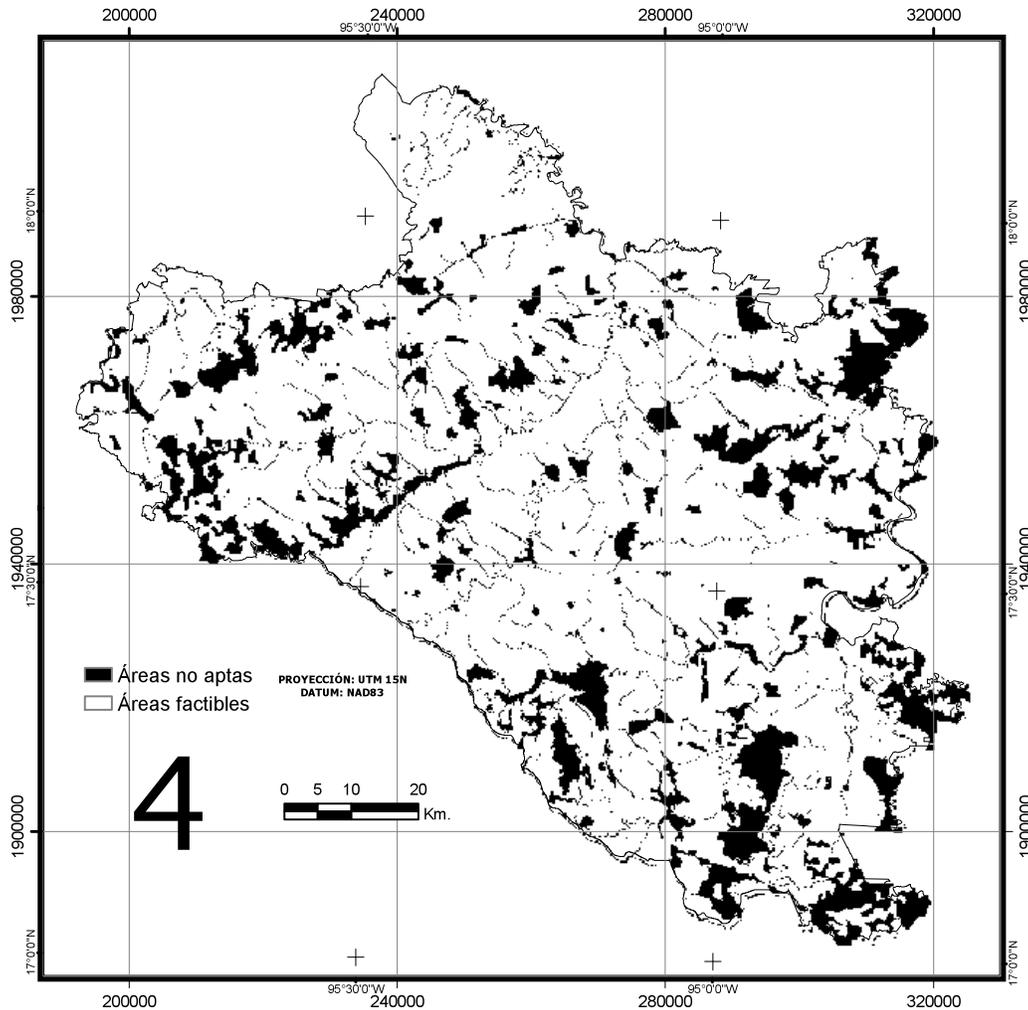


Figura 15. Mapa de áreas factibles para el establecimiento de plantaciones.

#### 2.4.6. Evaluación multicriterio espacial

La evaluación para generar los niveles de aptitud en el área de estudio fue a través de la combinación de metodologías como el Proceso de Análisis Jerarquizado (AHP—Analytical Hierarchy Process), técnicas fuzzy y el método conocido como Sumatoria Lineal Jerarquizada. La estructura jerárquica de los criterios y subcriterios utilizados se presentan en la Figura 16.

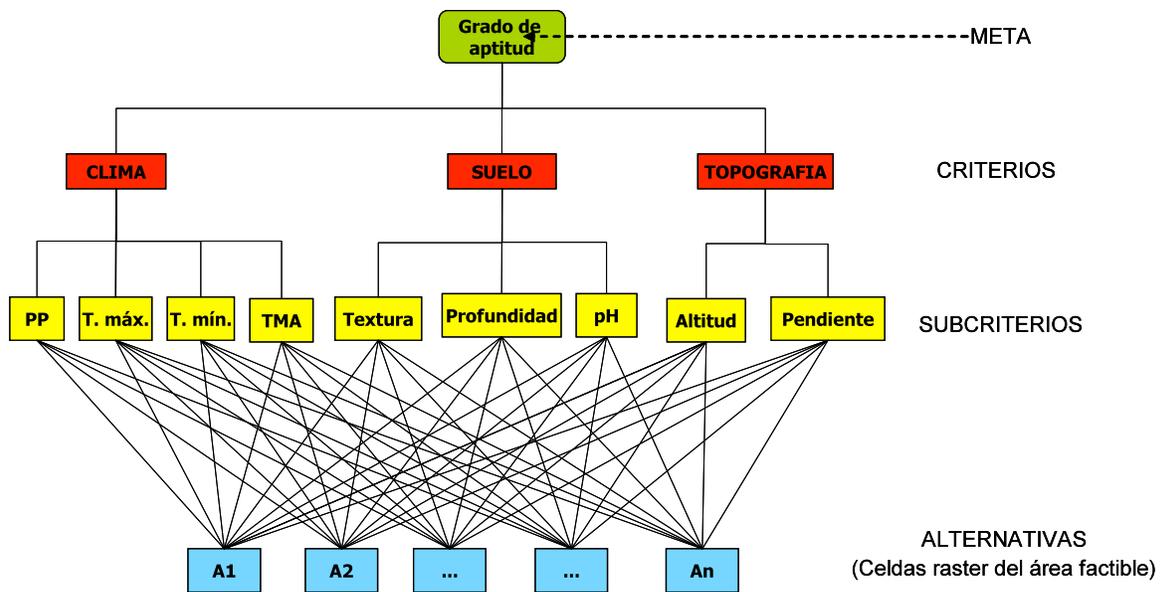


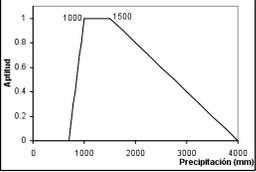
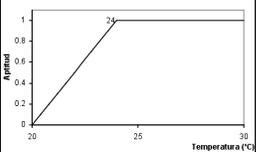
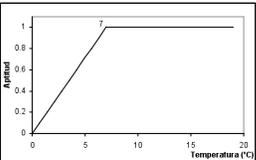
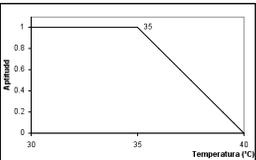
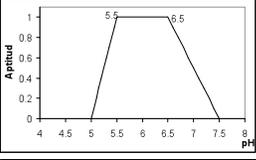
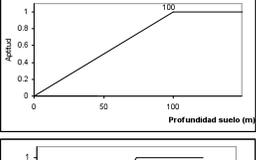
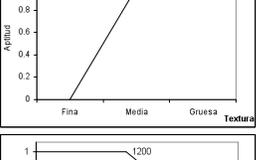
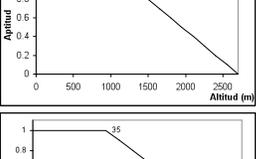
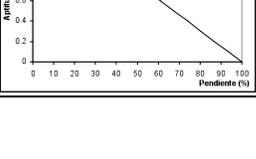
Figura 16. Estructura jerárquica de los criterios y subcriterios considerados en el estudio.

#### 2.4.6.1 Estandarización de los criterios de evaluación

Dado que los mapas criterio poseen diferentes escalas de medida, se requirió estandarizarlos y transformarlos a unidades comparables. Para este proceso se utilizó la técnica fuzzy (funciones de pertenencia o membresía) por permitir la estandarización tanto de los mapas continuos como de los categóricos usados en este estudio.

Las funciones de pertenencia se generaron considerando los requerimientos de cada especie, de acuerdo con el tipo de variable (continua o discreta), la respuesta de la especie a cada uno de los factores de estratificación y al rango de valores existente de los criterios en el área de estudio. Se asignó el valor de 1 a los valores óptimos para el desarrollo de la especie en cada criterio y el valor de 0 a los valores más distantes de los criterios de evaluación, estos se resumen en los Cuadros 5 y 6.

Cuadro 5. Funciones de pertenencia de los requerimientos del *E. grandis* respecto a los criterios ecológicos del área de estudio.

Criterio	Valores óptimos		Rangos de los requerimientos		Función de pertenencia
	mín.	máx.	mín.	máx.	
Precipitación	1000	1500	700	4000	
T. media anual	24	35	20		
T. mín.	>7		0		
T. máx.	30°	35		40	
pH	5.5	6.5	5.0	7.5	
Profundidad del suelo	>100		0	>100	
Textura	Media		Fina	Gruesa	
Altitud	0	600		2700	
Pendiente	<35			100	

Cuadro 6. Funciones de pertenencia de los requerimientos del *E. urophylla* respecto a los criterios ecológicos del área de estudio.

Criterio	Valores óptimos		Rangos de los requerimientos		Función de pertenencia
	Mín	Máx	Mín	Máx	
Precipitación	1300	2500	900	2750	
T. media anual	24	35	20	40	
T. mín.	>10		5		
T. máx.	32	35		40	
pH	5.5	6.5	5.0	7.5	
Profundidad del suelo	>100		0	>100	
Textura	Media		Fina	Gruesa	
Altitud	0	1200		2700	
Pendiente	<35%			100	

#### **2.4.6.2 Obtención de los pesos (W)**

El orden de importancia de los criterios fue evaluado de acuerdo a la opinión de 11 expertos en plantaciones forestales comerciales en México, a partir de matrices de comparación por pares (ANEXO I). Los pesos de importancia relativa de las matrices construidas y su consistencia se calcularon en el modulo WEIGHT del software IDRISI. Para la asignación de pesos a cada criterio se promediaron los resultados de las matrices que arrojaron un índice de consistencia mayor a 0.1, siguiendo la metodología descrita en el Capitulo I apartado 1.2.6.

#### **2.4.6.3 Generación de mapa de aptitud**

Una vez obtenidos los valores de importancia de cada criterio, se procedió a su agregación para generar el mapa de aptitud mediante la sumatoria lineal jerarquizada implementada en el modulo MCE de IDRISI, la cual consiste en la multiplicación de cada mapa criterio estandarizado por su peso correspondiente, seguida de la sumatoria de todos los criterios y finalmente la ponderación de los valores obtenidos en la imagen. Particularmente el modulo requiere que las imágenes tengan números enteros con valores de 0 a 255, el valor 0 esta asociado al nivel más bajo de aptitud y el 255 a un nivel muy alto de aptitud. Para obtener valores 0 a 1 cada valor de la imagen se dividió entre 255 (Figura 17).

El mapa de zonificación final se obtuvo multiplicando el mapa de áreas factibles (Figura 13) por el mapa de aptitud final para discriminar las áreas no aptas (Figura 17).

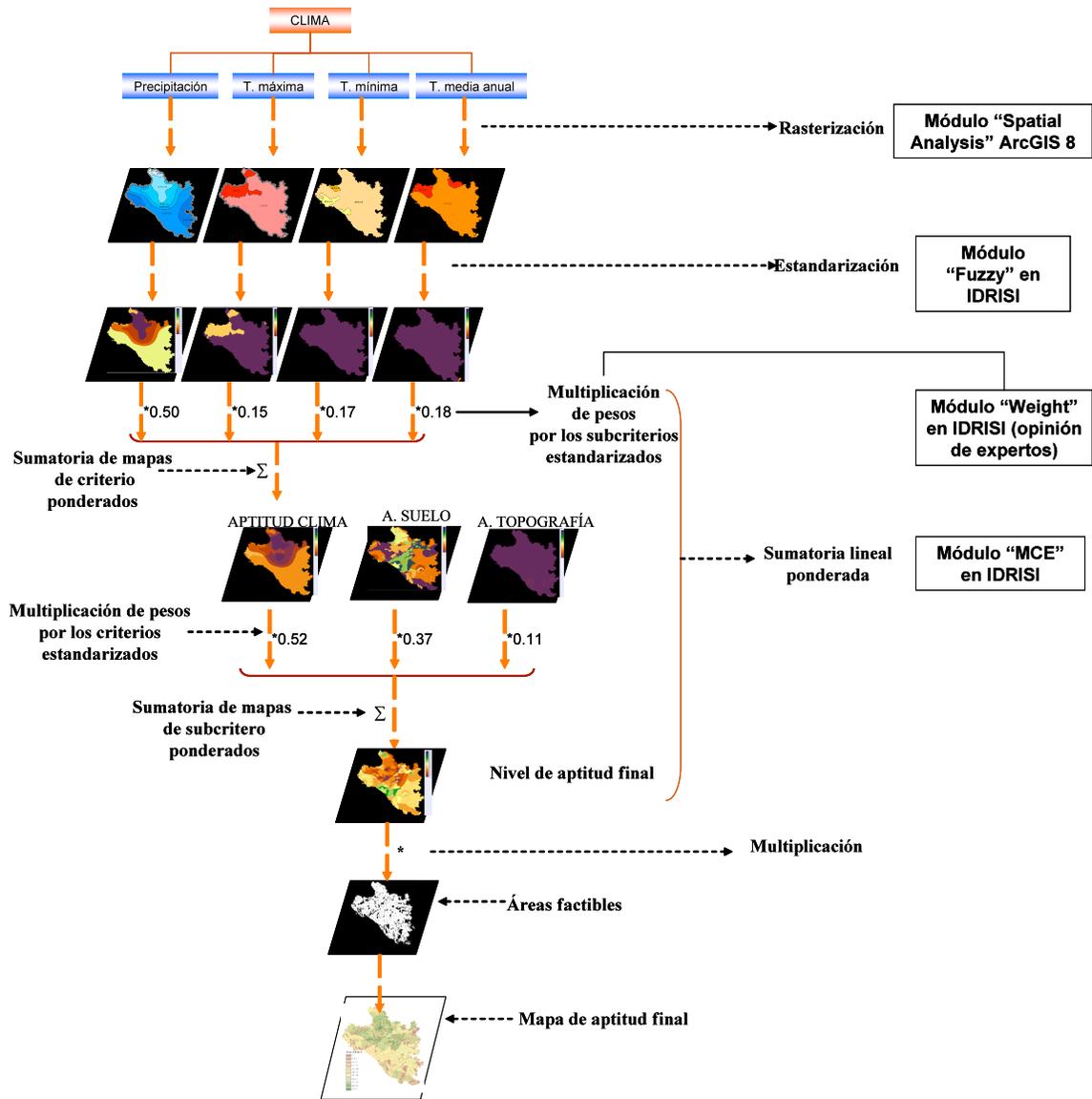


Figura 17. Esquema metodológico que muestra la secuencia de evaluación y utilización del método de evaluación multicriterio conocido como AHP.

#### 2.4.7. Álgebra booleana

Para la aplicación de esta metodología se utilizaron los mapas utilizados en el método de evaluación multicriterio AHP. Los requerimientos óptimos de cada especie fueron utilizados para clasificar los mapas, discriminando las áreas que no coincidieran con estos requerimientos. Cada mapa se rasterizó y se reclasificó con valores de 1 para las áreas aptas y 0 para las no aptas. Finalmente se multiplicó cada cobertura entre si incluyendo la cobertura de áreas factibles, resultando el mapa de aptitud final.

## 2.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una fase crucial para la aplicación de los métodos de evaluación multicriterio es la asignación de pesos a los criterios, para este estudio se realizaron 11 entrevistas a expertos en plantaciones forestales en México. Las matrices de los subcriterios del suelo fueron las que tuvieron menor número de matrices consistentes con solo 4 de las 11 generadas, seguido de las matrices de criterios con 5, después la de subcriterios de clima con 7 y finalmente la de topografía la cual, por ser una matriz dos por dos las, 11 fueron consistentes. La opinión de expertos fue variable pues el vector de prioridades cambiaba no solo en valor de importancia sino también en el orden, tomando en cuenta que la escala es de 0 a 1 y había diferencias entre valores máximos y mínimos de hasta 0.54. Esto puede ser debido a que todos los expertos son de diferentes partes de México y han trabajado con diferentes especies y en distintas condiciones, sin embargo, la utilización de los promedios de los vectores calculados de las matrices consistentes resultó una buena forma para compensar estas variaciones debido a que expresa el orden de prioridad asignado por la mayoría de los expertos, de tal manera que los valores ponderados para cada criterio fueron: 0.52 para clima, 0.37 para suelo, 0.11 para topografía, un resumen de los resultados obtenidos son presentados en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Resumen de los resultados de las matrices de comparación pareada y pesos asignados a cada criterio de evaluación.

CRITERIOS	MIN	MAX	PROMEDIO	PESOS PONDERADOS	Moda de Orden de Prioridad
Clima	0.29	0.75	0.53	0.52	1
Suelo	0.18	0.66	0.37	0.37	2
Topografía	0.05	0.2	0.11	0.11	3
<b>SUBCRITERIOS</b>					
Precipitación	0.33	0.69	0.52	0.50	1
Temperatura máxima	0.06	0.31	0.15	0.15	3
T. mínima	0.05	0.31	0.17	0.17	4
T. media anual	0.04	0.31	0.19	0.18	2
Textura del suelo	0.06	0.60	0.28	0.28	3
Profundidad del suelo	0.2	0.64	0.46	0.46	1
pH del suelo	0.1	0.49	0.25	0.25	2
Altitud	0.13	0.88	0.5	0.5	1
Pendiente	0.13	0.88	0.5	0.5	1

Los rangos de aptitud obtenidos para el área factible fue de 0.39 a 1 para *E. grandis* y 0.59 a 1 para *E. urophylla*. Para facilitar la interpretación de los datos se clasificaron las áreas en tres rangos de aptitud  $>0$  a 0.7 baja,  $>0.7$  a 0.9 media y  $>0.9$  a 1 alta. Las Figuras 18a y 19a muestran la ubicación y clasificación de los niveles de aptitud, para *E. grandis* y *E. urophylla* respectivamente. En las Figuras 18b y 19b se muestra la clasificación de la aptitud de la tierra para las dos especies utilizando la metodología booleana convencional. Al comparar las Figuras 18a y 18b se observa que la distribución espacial de las áreas aptas obtenidas a través de la metodología booleana forma parte de las áreas clasificadas como de aptitud alta con el método AHP-fuzzy. Esto se atribuye a que ambas metodologías incluyen los mismos criterios de evaluación. Sin embargo, con la metodología booleana solo se cuantificaron 15,618 ha consideradas como aptas para el establecimiento de plantaciones de *E. grandis*, mientras que con AHP-Fuzzy, se obtuvo un área de 161,490 ha. Esto se debe, principalmente, al más reducido rango de los requerimientos (únicamente el rango óptimo) considerado en la metodología booleana.

En la evaluación de áreas para *E. urophylla* ocurrió lo mismo, con algebra booleana se clasificaron 157,836 ha como áreas aptas, mientras que mediante AHP-Fuzzy este valor se incrementó a 480,991 ha, considerando únicamente la categoría “Aptitud Alta”. Burrough *et al.* (1992) señalan que al usar algebra booleana para el análisis de aptitud de la tierra hay una pérdida considerable de información, lo cual es consistente con lo aquí observado.

Las áreas con aptitud media y baja son discriminadas por la metodología booleana debido a que las áreas seleccionadas deben reunir los requerimientos de todos los criterios de evaluación de manera óptima. Contrariamente, la asignación de pesos a cada uno de los criterios de evaluación en la metodología AHP, permite seleccionar áreas que, aun cuando no reúnen totalmente los requerimientos de un determinado factor, pero por tener valores muy cercanos a los límites óptimos, o por ser éste poco relevante de acuerdo con su valor de ponderación, no impactan significativamente la determinación de la aptitud total.

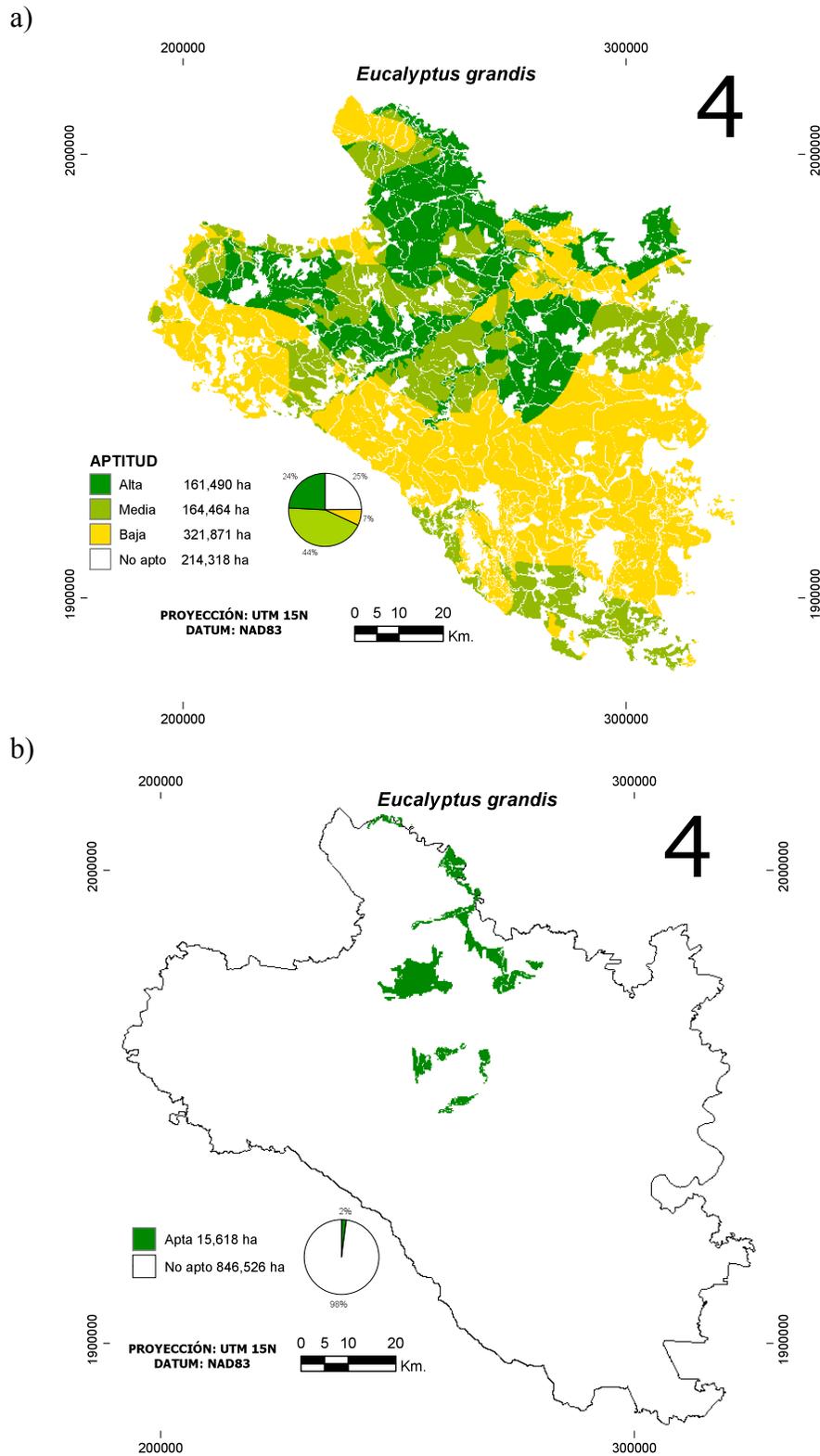


Figura 18. Zonificación y distribución de superficies con aptitud para *Eucalyptus grandis*: a) Evaluación multicriterio (AHP-Fuzzy), b) Álgebra booleana.

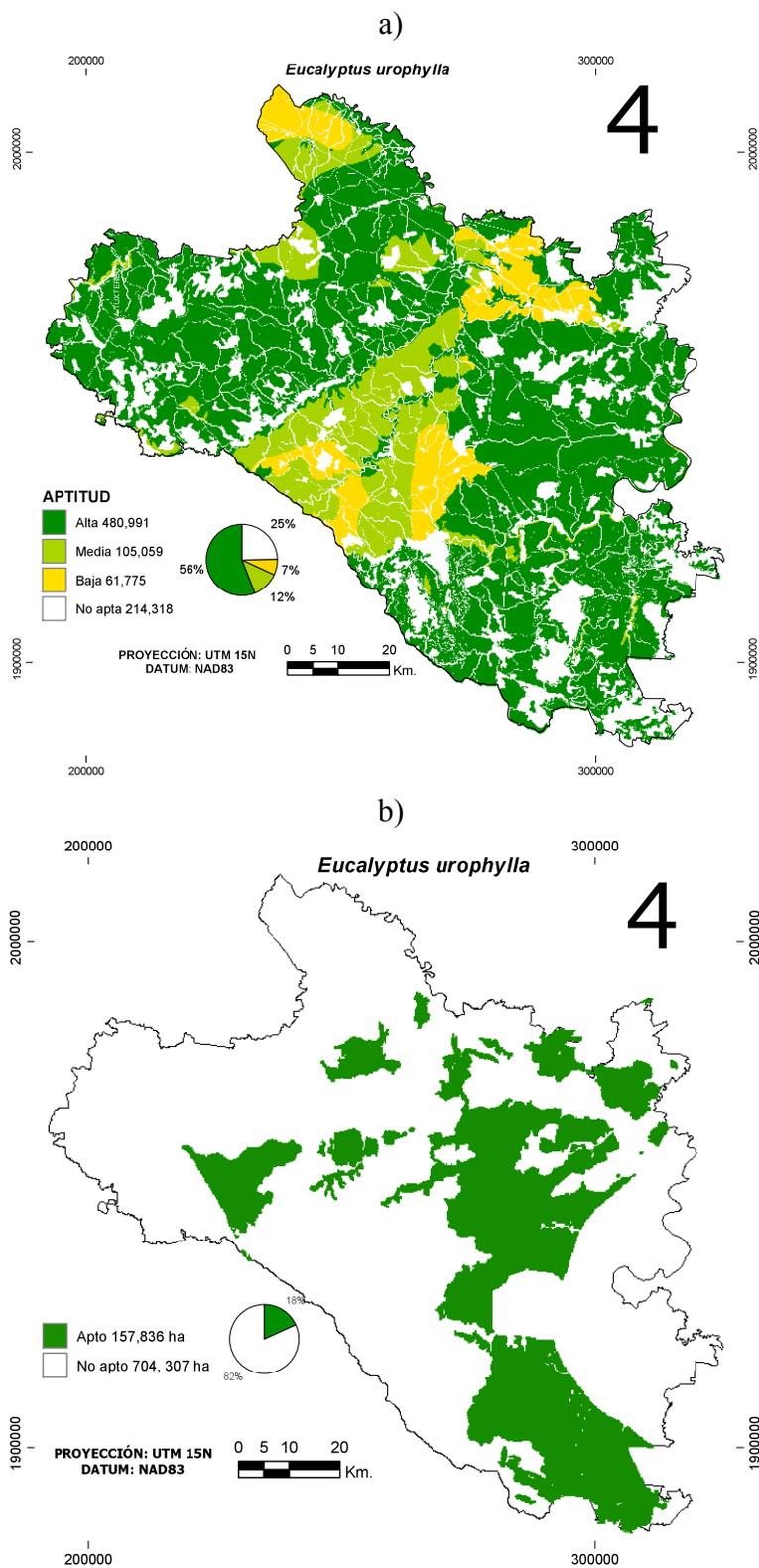


Figura 19. Zonificación y distribución de superficies con aptitud para *Eucalyptus urophylla*: a) Evaluación multicriterio (AHP-Fuzzy), b) Álgebra booleana.

La diferencia más obvia entre las Figuras 18a y 18b, y entre la 19a y 19b es que con las técnicas AHP-Fuzzy es posible clasificar casi en su totalidad el área de influencia, mientras que con la metodología booleana, más del 80% de la superficie es discriminada como sin aptitud.

A pesar de la separación en clases de aptitud, en los resultados no se observa una transición gradual, como menciona García *et al.* (2004) el enfoque fuzzy permite una mejor representación de la variabilidad espacial de información cartográfica continua, pero en el caso de este estudio no fue posible observarlo ya que en su mayoría la información utilizada en este estudio fue categórica y para el caso de la altitud y la pendiente (cartografía continua), donde se pudo haber observado, los valores estaban en los rangos óptimos de los requerimientos, por lo tanto se clasificaron con el valor máximo de aptitud, todos los valores.

Gómez (2006) ajustó un grupo de modelos de crecimiento en altura dominante y definió las mejores familias de índice de sitio (IS) para plantaciones establecidas en el área de estudio. En base a mínimos cuadrados este autor estimó los parámetros de crecimiento promedio a una edad base de 80 meses. El Cuadro 8 y las Figuras 18a y 18b muestran como se distribuyen los IS por especie y aptitud. El área de plantaciones esta clasificada como de aptitud media y baja. Los IS del *E. grandis* no parecen tener compatibilidad con la aptitud obtenida, ya que se encuentran distribuidos en el área de aptitud baja, rangos de IS mayores de 20 inclusive hasta el rango más alto de 27 a 38. Para el *E. urophylla* ocurre algo similar, sin embargo los rango de IS más altos de 27 a 38 solo se encuentran distribuidos en el área clasificada como de aptitud media. Esto puede deberse a una de las diferencias principales en los requerimientos óptimos reportados de precipitación para cada una de las especies ya que el *E. urophylla* tiene un rango optimo más amplio. (Capítulo II apartados 4.2.2 y 4.2.3). Otro factor importante que puede estar influyendo en esta aparente contradicción es la escala relativamente pequeña de los mapas criterio utilizados y el germoplasma utilizado en las plantaciones. La presencia de buenos IS en el área de baja aptitud refuerza la idea de clasificar las áreas que no reúnen totalmente los requerimientos de la especie.

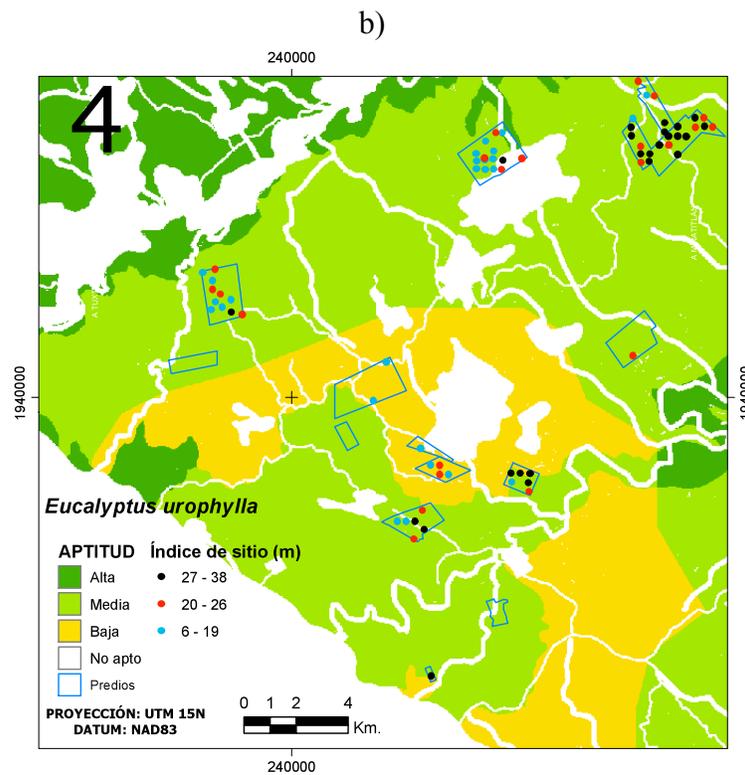
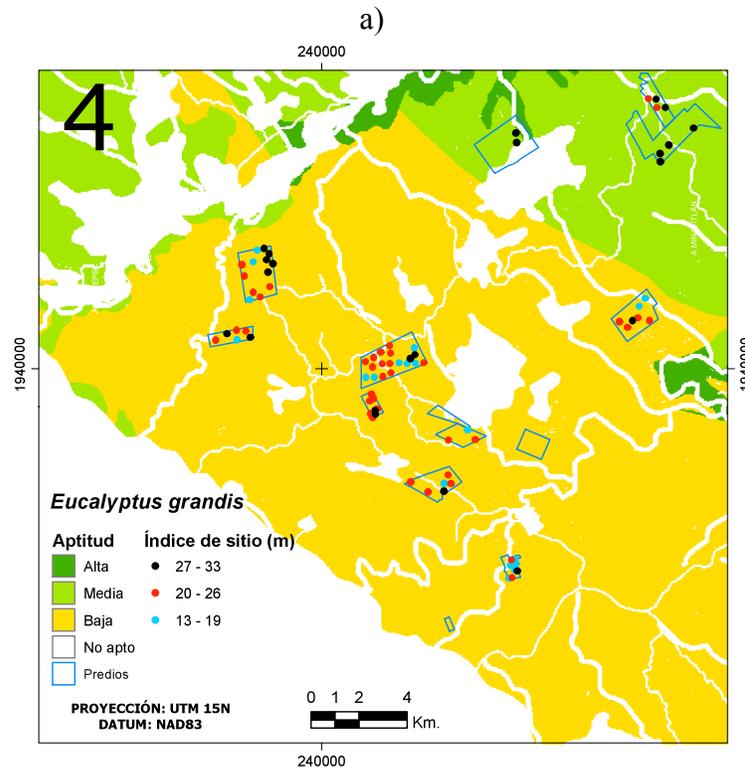


Figura 20. Áreas con plantaciones establecidas con sitios de muestreo, a) *E. grandis* y b) *E. urophylla*

Cuadro 8. Número de sitios por especie e IS distribuidos en las áreas de aptitud media y baja.

IS	<i>E. grandis</i>		<i>E. urophylla</i>	
	A. Media	A. Baja	A. Media	A. Baja
27-38	8	14	23	0
20-26	2	35	18	2
6-19		19	21	5

La distribución de las superficies por clase de aptitud y municipio se muestran en el Cuadro 9. Se observa que para *E. urophylla* la mayor parte de la superficie esta clasificada como apta, caso contrario con *E. grandis*, sin embargo, hay una buena cantidad de superficie clasificada como de aptitud alta y media con casi el 50% de la superficie factible.

Las áreas con aptitud alta para *E. grandis* se distribuyeron principalmente en los municipios del Estado de Veracruz, siendo San Juan Evangelista el que obtuvo mayor superficie apta, en el caso de *E. urophylla*, Jesús Carranza es el municipio con mayor área apta.

En cuanto a la superficie clasificada por tipo de metodología se tiene que mediante el álgebra booleana se obtuvieron 15,617.8 ha para *E. grandis* y 157,835 ha para *E. urophylla*; las cuales en comparación con las obtenidas a través de la metodología AHP-Fuzzy son bajas.

Cuadro 9. Superficies de grado de aptitud por método y municipio (ha).

	<i>E. grandis</i>			<i>E. urophylla</i>		
	Alta	Media	Baja	Alta	Media	Baja
Zonificación Booleana	15,617.8			157,835.8		
Zonificación AHP-Fuzzy	161,490.1	164,464.5	321,870.7	480,990.7	105,059.1	61,775.5
Zonificación AHP-Fuzzy por municipio						
Santiago Yaveo, Oax.	3,368.8	19,368.6	24,666.8	5,062.2	36,104.9	6,237.2
San Juan Mazatlán, Oax.	0	3,781.1	2,992.6	6,480.0	293.7	0
Matías Romero, Oax.	0	26,382.8	31,953.1	56,803.0	1,519.2	13.7
San Juan Guichigovi, Oax.	0	4,165.6	4,217.0	3,160.0	5,190.8	31.9
San Juan Cotozocon, Oax.	576.9	2,382.2	37,236.1	3,002.3	20,413.3	16,779.7
Texistepec, Ver.	8,108.0	11,851.1	7,960.7	27,423.1	327.8	168.9
Santiago Sochiapan, Ver.	0	5,656.1	19,698.9	23,365.8	1,989.3	0
Sayula de Alemán, Ver.	16,390.8	11,524.2	24,345.7	41,414.8	566.1	10,279.9
Playa Vicente, Ver.	32,328.3	27,964.7	28,368.6	87,368.9	1,292.8	0
San Juan Evangelista, Ver.	52,007.3	29,814.4	17,786.5	64,997.1	20,487.5	14,123.6
Juan Rodríguez Clara, Ver.	47,088.5	21,489.0	15,879.7	53,940.2	19,070.5	11,446.7
Jesús Carranza, Ver.	1,587.7	0	106,785.5	102,695.9	2,941.2	2,736.1

## 2.6. CONCLUSIONES

Este estudio confirma que la evaluación multicriterio analizada combinando métodos como AHP, Lógica Fuzzy y la sumatoria lineal ponderada, es adecuada para evaluar la aptitud de la tierra integrando criterios como clima, suelo y topografía en un ambiente SIG. La delimitación y clasificación de áreas para establecer plantaciones de *E. grandis* y *E. urophylla* resultó ser útil y tener ventajas sobre la evaluación a través del álgebra booleana, ya que se obtiene información de las áreas con características similares a las óptimas, en donde las especies de interés pueden tener buenos crecimientos.

Las técnicas multicriterio utilizadas en este estudio son herramientas útiles, pero la calidad de los resultados dependieron en gran medida de la información cartográfica, la opinión de expertos y de las funciones de pertenencia basada en los requerimientos de la especie, obtenidas de la revisión de literatura, tanto del lugar de origen de las especies, como de lugares en donde se ha tenido éxito con plantaciones.

Hay área suficiente con aptitud alta para cubrir con la meta de 20,000 ha de la empresa PLANTEH, sin embargo, hay que tomar en cuenta que este estudio solo es desde el punto de vista de los requerimientos de la especie y es necesario complementarlo con estudios de factibilidad económica y social.

## **CAPÍTULO III. SITE INDEX AND SOIL PROPERTIES IN YOUNG PLANTATIONS OF *Eucalyptus grandis* AND *E. urophylla* IN SOUTHEAST MÉXICO**

### **3.1. ABSTRACT**

Research on the ability of tropical soils to support fast-growing forestry is needed to optimize, preserve and select lands for timber production. In this work Site Index (SI) of *Eucalyptus grandis* and *E. urophylla* plantations was related to chemical and physical soil properties. The best fitted model suggests that SI improves as the sand content increases. A sand content of 28% on the surface soil (0-5 cm) and 22% on the sub-surface (5-30 cm) is the desired minimum for establishing highly productive eucalyptus stands. The best SI conditions were found at sandy soils with a sand content of 65%. Other variables, such as soil bulk density, N mineralization and organic matter were also measured but were not correlated with stand growth or SI. Cation exchange capacity was inversely related to tree growth, which was explained as an indirect relationship, since soil with higher content of fine soil particles (clay+silt ) were less productive.

*Key words: forest plantations, site productivity, forest soils, soil physical properties.*

### **3.2. INTRODUCTION**

Site index (SI) is referred as the height of dominant trees in a stand at a specific age and has been a useful criterion for identifying sites with high potential for tree growth (Clutter *et al.*, 1983;). Unfortunately SI can be directly estimated only in wooded areas; however, relating SI with soil properties is a useful approach to predict forest productivity in lands without trees (Carmean, 1975). Screening sites by soil productivity is a useful method to properly use the potential of each site and plan forestry activities in a sustainable way (Mckenney and Pedlar, 2003). Studies of productivity in forest plantations are also important as their establishment in non previous forest use lands contributes to sequestering carbon by transferring atmospheric CO<sub>2</sub> to the plant and soil system (Zinn *et al.*, 2002; Forrester *et al.*, 2006; Lima *et al.*, 2006). For example, Lemma *et al.* (2006) found that a 20-year afforestation with *Eucalyptus grandis* in lands previously used for agricultural

purposes returned the levels of soil organic carbon content to that of the native forests. This work focus on relating SI of *Eucalyptus grandis* and *E. urophylla* with soil properties in plantations established in one of the regions with the highest potential for establishing tropical plantations in Mexico in order to predict productivity in lands to be planted.

### 3.3. MATERIALS AND METHODS

#### 3.3.1. Study area

The study area is located at 17° 07' - 17° 54' N and 94° 52' - 95° 54' W around the boundary of Oaxaca and Veracruz states (Figure 21). Dominant climate is tropical wet (Aw) with mean annual temperature of 27°C and mean annual precipitation ranging from 1500 to 2400 mm. Mean elevation is 150 m above sea level. Soil types in the area belong to the orders of Alfisols and Ultisols (Soil Survey Staff, 1997). A summary of the soil characteristics in the study sites is presented in Table 10.

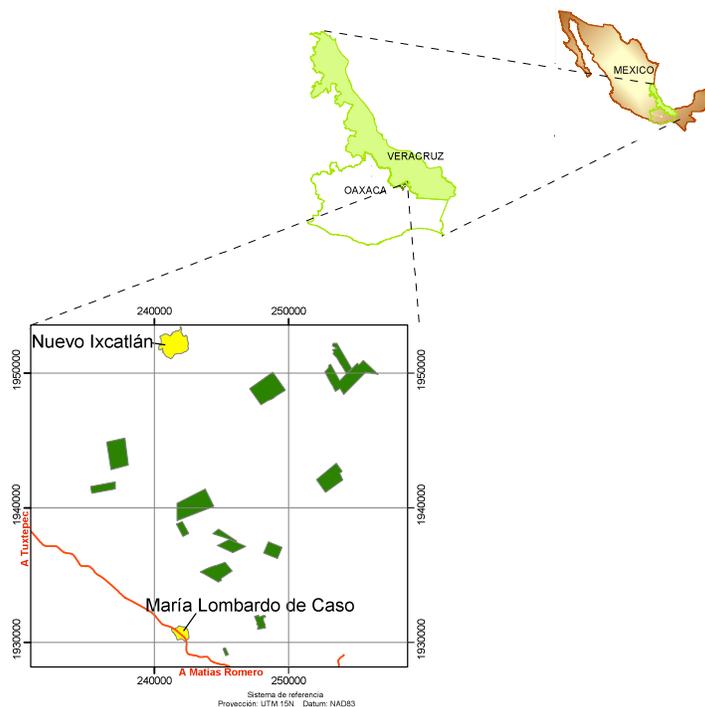


Figure 21. Location of the 13 plantations where 45 study sites of *E. grandis* y *E. urophylla* were established at the Santiago Yaveo, Oaxaca area.

Table 10. Surface soil properties measured at the 45 study sites.

	Soil Depth (cm)											
	0-5				5-15				15-30			
	Min	Max	Mean§	s <sup>2</sup>	Min	Max	Mean	s <sup>2</sup>	Min	Max	Mean	s <sup>2</sup>
Sand (%)	13	77	49.3	2.88	13	80	50	2.95	13	80	47	3.08
Clay (%)	11	43	11	1.43	9	40	24.2	1.4	10	41	24.4	1.54
Silt (%)	11	45	24.7	1.54	11	47	26	1.64	9	53	28.2	1.92
OM (%)	1.3	7.3	3.4	0.2	0.6	3.8	2.2	0.13	0.2	3.5	1.4	0.1
SC	2	7	3.6	0.15	3	7	4	0.13	2	6	4.1	0.15
CEC (Cmol.kg <sup>-1</sup> )	2.5	19.9	7.4	0.54	2	16.2	6	0.5	1.4	15.4	5.3	0.5
DBD (Mgm <sup>-3</sup> )	0.80	1.24	1.0	0.01	0.77	1.47	1.3	0.02	0.83	1.47	1.3	0.02
N-m (ppm)	0.07	2.41	1.0	0.1	0.04	1.56	0.6	0.04	0.02	1.06	0.3	0.02

OM=organic matter; CEC= Cation exchange Capacity; DBD= Dry Bulk Density. SC= Munsell Chart Color Value (wet), N-m= N mineralization determined by an anaerobic method.

§ n=45.

### 3.3.2. Plantations description

The establishment of the plantations under study started in 1998 with *Eucalyptus grandis* and *E. urophylla* on lands used for grazing in the last 40 years. The native vegetation in the area was tropical forest, but an intense program promoted by the Mexican government encouraged land use change in the 1960's and 1970's (Masera *et al.*, 1992; Paz, 1995). Plantations were 28 to 77 months-old at the moment of the study and were planted 3 m apart in a square grid fashion. Plantation management activities included fertilization at a rate of 60-60-30 kg ha<sup>-1</sup> for NPK three times a year during the two firsts years of establishment. Competition removal was performed during the first three months. After that time of the establishment the plantation is not at risk by plant competition.

### 3.3.3. Soil sampling

In 2004, 154 500 m<sup>2</sup> circle-shaped permanent plots were established on PLANTEH's planted lands and the dasometric data were used for fitting tree growth and yield models (Gómez, 2006). In 2006 forty five of the 154 plots were re-measured. Each plot was divided into four quadrants where soil samples were obtained at 0-5, 5-15 and 15-30 cm depths. Samples from the four quadrants were used to make a composed sample for

laboratory soil analyses. Additionally, soil bulk density samples were taken at every quadrant at the same soil depths using a core sampler with hammer as illustrated in Figure 22. Since soil bulk density is more variable at the soil surface, an additional sample of it was taken for the first soil depth. A total of 720 soil samples for bulk density were taken for this study.

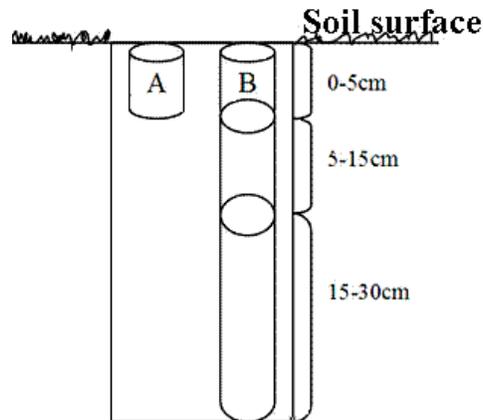


Figure 23. Soil depths monitored for dry bulk density in the study.

Collected soil samples were air dried and sieved through a 2-mm mesh. Soil analyses included: pH, organic matter (Walkley – Black), soil texture (Bouyoucos), cation exchange capacity (Ammonium acetate, pH 7) (Rowell, 1994) and an anaerobic N-mineralization as described by Powers (1980).

### 3.3.4. Site index estimates

The dominant height models used to obtain the SI estimates at each plot were developed by Gomez (2006) and are:

$$SI = A_I \left( \frac{1 + \exp(3.162695 - 0.808662 \times \ln E_I)}{1 + \exp(3.162695 - 0.808662 \times \ln E_b)} \right) \quad \text{for } Eucalyptus \text{ grandis} \dots\dots(1)$$

$$SI = \frac{40}{1 + \left( \left( \frac{40}{A_I} - 1 \right) x \left( \frac{E_I}{E_b} \right)^{0.808662 + 0.911396 \times I_U} \right)} \quad \text{for } E. \text{ urophylla} \dots\dots\dots(2)$$

Where SI is site index,  $A_I$  = dominant height at the  $E_I$  age,  $E_b$  = base age of 80 months

These equations are based on the Hossfeld IV model (Cieszewski, 2001; Kiviste *et al.*, 2002). More details on the conditions of fit and validation of these models can be found in Gómez (2006). The SI estimates were placed on 3 m classes.

### 3.3.5. Statistical analysis.

Soil variables were initially correlated to SI and tree growth using PROC CORR of SAS V8 (SAS, 1998). Soil variables were also plotted against SI to identify patterns and trends. A simple trend between sand content and SI was described on all soil depths by the following segmented model:

$$IS = \alpha_0 + \alpha_1 \times (j - S)^2 \times I_j \dots\dots\dots(3)$$

Where, S= sand content in %, j= inflection point at which  $IS = \alpha_0$  becomes  $IS = \alpha_0 + \alpha_1 \times (j - S)^2$ ,  $I_j$  is the indicator variable equal to 1 for  $S > j$

Equation (3) has the advantage that the inflection point is treated as a parameter and can be estimated using non-linear regression. This parameter represents the lowest acceptable sand content before SI stalls.

Marginal increments for SI after the inflection (j) can be estimated as

$$\frac{d}{dS} IS = -2 \times \alpha_1 \times (j - S) \dots\dots\dots(4)$$

The model was fitted using PROC MODEL (SAS , 1998).

## 3.4. RESULTS

Table 11 summarizes tree growth parameters for the 45 study sites. Tree age ranged from 24 to 73 months and the SI ranked from 16 a 38 m at the base age of 80 months. Basal areas varied from 2 a 26 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>, and stand volume from 8 to 229 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>. Current increments in stem ranged from 0.3 a 6.8 m<sup>-3</sup> month<sup>-1</sup>, which correspond to 43.2 a 81.6 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>.

Table 11. Stand parameters for the 45 study plots.

Location	Site	Site index (m)	Relative productivity	Species	Age (month)	Basal area (m <sup>2</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )	Periodic increment (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> month <sup>-1</sup> )
La Colmena	1	22	M	G	60	11	99	1.7
	2	24	M	G	60	14	135	2.3
	4	24	M	U	25	3	16	0.6
	5	28	H	G	60	17	197	3.3
	8	21	M	G	60	15	133	2.2
El Rosario	3	22	M	G	64	14	131	2.0
	4	29	H	U	40	8	21	0.5
	5	24	M	U	64	13	132	2.1
	6	29	H	U	64	26	332	5.2
	8	28	H	G	64	21	240	3.8
	9	17	L	G	64	9	75	1.2
	11	35	H	U	50	21	259	5.2
La Esperanza 1	16	32	H	G	55	20	242	4.4
	17	22	M	U	50	11	97	1.9
	18	31	H	U	55	18	209	3.8
	20	34	H	U	50	17	207	4.1
	22	38	H	U	50	25	339	6.8
	24	28	H	U	50	11	127	2.5
	27	29	H	U	55	12	145	2.6
	28	22	M	U	58	11	90	1.6
	29	29	H	G	50	16	163	3.3
	31	36	H	U	50	23	298	6.0
La Esperanza 2	2	29	H	U	50	17	188	3.8
	3	32	H	G	50	16	184	3.7
	5	28	H	G	50	15	151	3.0
	7	19	L	U	50	9	72	1.4
La Estrella	2	18	L	U	28	3	20	0.7
	3	22	M	G	62	15	142	2.3
	5	18	L	G	62	10	77	1.2
	6	19	L	G	62	10	61	1.0
	8	22	M	G	62	14	110	2.2
	10	22	M	G	62	15	148	2.4
La Tapatia	17	18	L	U	28	9	20	0.7
	2	22	M	U	28	11	74	2.6
	3	23	M	U	28	3	14	0.5
	6	23	M	U	41	16	136	3.3
Los Mangos	4	23	M	G	73	21	228	3.1
	5	17	L	G	73	14	124	1.7
	8	17	L	G	73	11	109	1.5
	9	22	M	G	73	16	166	2.3
	10	19	L	G	73	14	132	1.8
Sta. Teresa	7	24	M	U	25	4	29	1.2
	9	26	M	G	40	10	77	1.9
	10	21	M	G	60	13	120	2.0
	11	16	L	U	24	2	8	0.3

*E. grandis* (G), *E. urophylla* (U), Low (L), Medium (M), High (H).

Soil properties and tree growth relationships are summarized in Tables 12 to 14. The soil variable more correlated to SI was soil texture, with larger soil components like sand showing a positive correlation, whereas fine soil particles showed and negative association to SI. This trend was held at the three soil depths. Cation exchange capacity (CEC) was negatively related to the SI and current increment (CI). Organic matter and CEC showed a high correlation (0.64), but this relationship was significant only in the 0-5 cm soil depth. The highest correlation among soil variables occurred between CEC and soil texture with a negative relationship for the sand component and positive for finer soil particles like silt and clay. This strong correlation was held for the three soil depths. Dry bulk density (DBD) and N mineralization were not significantly related to tree growth.

Table 12. Correlation matrix for SI and soil properties at 0-5 cm soil depth.

	SI	IC	Sand	Silt	Clay	pH	OM	CEC	DBD	N-m§
SI	1									
IC	0.825	1								
Sand	0.660	0.577	1							
Silt	-0.670	-0.593	-0.969	1						
Clay	-0.609	-0.522	-0.971	0.884	1					
pH	-0.201	-0.269	-0.234	0.179	0.276	1				
OM	-0.461	-0.408	-0.580	0.571	0.549	-0.037	1			
CEC	-0.530	-0.527	-0.862	0.800	0.868	0.332	0.638	1		
DBD	0.164	0.176	0.360	-0.380	-0.322	-0.211	-0.249	-0.394	1	
N-m.	-0.128	-0.219	-0.411	0.344	0.452	0.245	0.219	0.491	-0.131	1

SI=Site index; CI= Current increment; OM=organic matter; CEC= Cation exchange Capacity; DBD= Dry Bulk Density.

§ N mineralization determined by an anaerobic method.

Table 13. Correlation matrix for SI and soil properties at 5-15 cm soil depth.

	SI	CI	Sand	Silt	Clay	pH	OM	CEC	DBD	N-m §
SI	1									
CI	0.825	1								
Sand	0.651	0.549	1							
Silt	-0.661	-0.579	-0.956	1						
Clay	-0.595	-0.482	-0.967	0.851	1					
pH	-0.291	-0.359	-0.353	0.314	0.359	1				
OM	-0.349	-0.194	-0.320	0.340	0.291	-0.134	1			
CEC	-0.489	-0.445	-0.820	0.731	0.840	0.501	0.302	1		
DBD	0.122	0.194	0.168	-0.144	-0.170	-0.101	0.026	-0.205	1	
N-m	-0.226	-0.369	-0.311	0.325	0.279	0.233	0.259	0.376	-0.221	1

SI=Site index; CI= Current increment; OM=organic matter; CEC= Cation exchange Capacity; DBD= Dry Bulk Density.

§ N mineralization determined by an anaerobic method.

Table 14. Correlation matrix for SI and soil properties at 15-30 cm soil depth.

	SI	CI	Sand	Silt	Clay	pH	OM	CEC	DBD	N-m §
SI	1									
CI	0.825	1								
Sand	0.677	0.557	1							
Silt	-0.666	-0.583	-0.915	1						
Clay	-0.609	-0.480	-0.956	0.758	1					
pH	0.083	-0.064	0.024	-0.070	0.005	1				
OM	-0.092	-0.144	-0.022	0.020	0.024	-0.241	1			
CEC	-0.531	-0.469	-0.817	0.749	0.777	0.171	0.214	1		
DBD	0.156	0.165	0.231	-0.206	-0.217	-0.031	0.134	-0.216	1	
N-m	-0.314	-0.341	-0.510	0.545	0.438	0.080	0.101	0.444	-0.013	1

SI=Site index; CI= Current increment; OM=organic matter; CEC= Cation exchange Capacity; DBD= Dry Bulk Density.

§ N mineralization determined by an anaerobic method.

Fitting parameters for Equation 3 at each soil depth is showed in Table 15. All parameters in the model are statistically significant including the inflection point  $j$ . When testing for differences between species, no statistical differences were found therefore a single equation per all depths is used. Figure 23 depicts the relationship between SI and sand content where this soil property explained from 51 to 53% of the variation of SI.

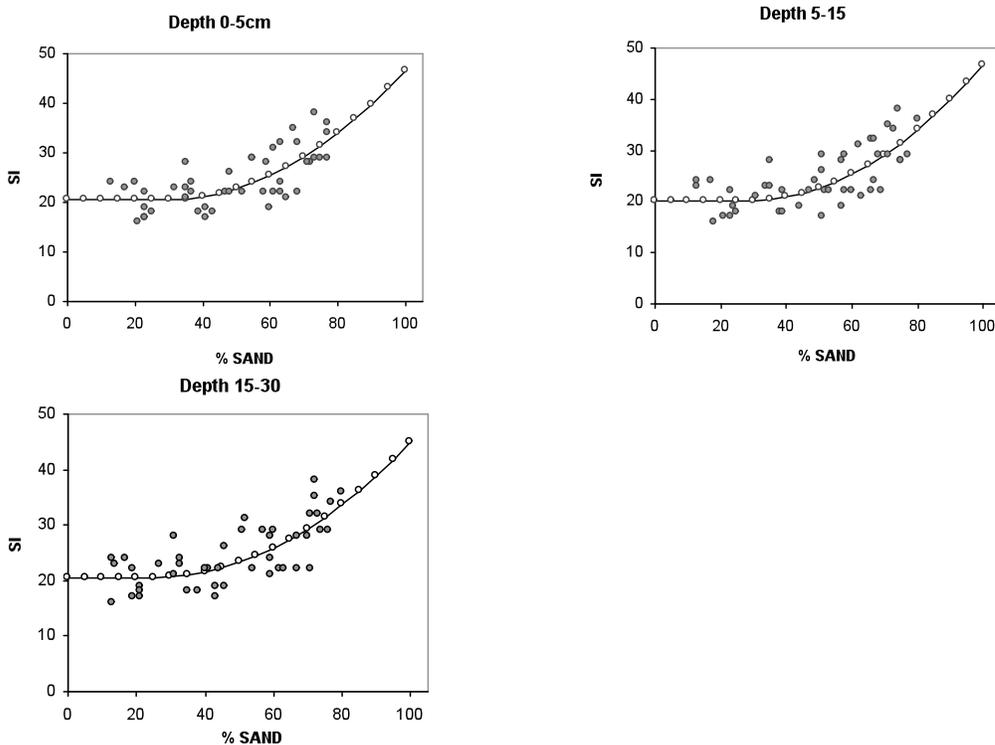


Figure 23. Relationship between SI and sand content at the three soil depths sampled.

Table 15. Estimated parameters for the different soil depths sampled.

Depths	Parameter	Estimate	Std Err	t Value	Pr >  t	R <sup>2</sup>
0-5	$\alpha_0$	20.45628	0.8775	23.31	<.0001	0.5173
	$\alpha_1$	0.005085	0.00190	2.68	0.0106	
	J	28.40465	7.6355	3.72	0.0006	
5-15	$\alpha_0$	20.23301	0.8704	23.25	<.0001	0.5268
	$\alpha_1$	0.005244	0.00173	3.03	0.0042	
	J	28.87633	6.4342	4.49	<.0001	
15-30	$\alpha_0$	20.49444	0.8764	23.38	<.0001	0.5339
	$\alpha_1$	0.004275	0.00164	2.61	0.0124	
	J	24.47576	8.8285	2.77	0.0083	

### 3.5. DISCUSSION

The wide range of values found for stand volume, basal area and current increment is a reflection of the variation in age of the plantations. However, differences in SI are indicating the variation in soil productivity at the sampled sites. The highest level of productivity found in this work was 81 m<sup>3</sup>ha<sup>-1</sup>year<sup>-1</sup> which is a productivity as high as those reported in very productive sites of Brazil. For example, Stape *et al.* (2006) reported productivities of 62 m<sup>3</sup>ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup> for intensive managed eucalyptus plantations. Productivity is influenced by water availability, and eucalyptus plantations with high water use efficiency yield up to 30 m<sup>3</sup>ha<sup>-1</sup>year<sup>-1</sup> in relatively dry sites with 1600 mm of annual precipitation (Stape *et al.*, 2004). In the study area the average annual precipitation is 2000 mm, which explains the higher productivity levels. Using wood stem density data and allometric equations for branch and leaf components from the studied plantations, aboveground net primary productivity was estimated at around 3,200 g·m<sup>2</sup>year<sup>-1</sup>, which is a high level of productivity if compared to figures reported for forest communities (Lieth, 1975; Powers, 1999).

Sand content was the most important variable found to describe SI variations. This relationship may be explained by the soil aeration regime which is improved with higher contents of gross soil particles. The relationship sand-SI fitted well all the data and followed the same pattern when the analysis was performed by soil depth. This is a consistent result that indicates that sand content in the soil surface is a critical variable for tree growth. According to the parameters of Equation (3), the amount of sand in the 0-5 cm soil depth starts influencing SI from sand contents around 28%, with marginal increments from 0.016 to 0.67 m per a percent unit of sand content. The influence of the 15-30 cm soil depth sand content in tree growth starts at 24% with marginal increments from 0.04 to 0.64 per a percent unit of sand content. The difference in sand content is indicating that the best sites for tree growth require coarse textures. From a physical perspective, the results are indicating that sites with better drainage in the upper 30 cm soil layer are more suitable for eucalyptus forest plantations. The relatively flat topography and high precipitation in the area may lead to a poor aeration regime so that soil texture becomes an important factor for soil productivity. Our results are consistent with the findings of Aparicio and López (1995) and Gonçalves *et al.* (1990) who reported similar results for *Eucalyptus grandis* in Brazil and Chile.

The lack of relationship between dry bulk density (DBD) and forest productivity is an unexpected result. In general, soils with higher DBD are less productive because the biological implications for root growth (Fisher and Binkley, 2000). Also, because sand content influences DBD a relationship between tree growth and DBD was expected. Goncalvez *et al.* (1997) found that the productivity of *Eucalyptus camaldulensis* was more than three times higher when DBD changed from 1.25 to 1.06 Mg m<sup>-3</sup> in a Inceptisol in Brazil. Correlation between soil texture and DBD was low for all soil depths reaching the highest value of 0.38 in the 0-5 cm soil depth (Table 15). The lack of correlation between DBD and soil texture maybe due to differences in soil structure. Although there is a general correlation between DBD and soil particles content, the level of organization of the soil which defines its structure may obscure a direct relation between these soil variables (Rowell, 1994).

DBD values found for the 0-5 cm soil depth varied from 0.82 to 1.24 Mg m<sup>-3</sup>, for the deeper soil layers values were 1.47 and 1.57 Mg m<sup>-3</sup> in the 5-15 and the 15-30 cm soil depths, respectively. DBD in the first 5 cm is favorable for tree root growth (Fisher and Binkley, 2000) but the higher values seen in the 5-10 and 15-30 cm soil depths should have shown some effect on tree growth as soil porosity is reduced (Fisher and Binkley, 2000). However, some eucalyptus plantations seems to perform well in Oxisols, Ultisols and Entisols with DBD values up to 1.6 mg m<sup>-3</sup>, as long as plants are not water stressed (Stape *et al.*, 2004). One explanation for the lack of association between tree growth and DBD in this study is the fact that the soil is relatively wet all the year. DBD influences tree root growth especially when changes in soil moisture lead to increases in soil strength (Gomez *et al.*, 2002). Probably, although DBD showed values relatively high in the subsoil, soil strength do not reach critical levels to impair root growth and hence soil productivity.

The poor correlation found between tree growth (SI) and N mineralization and soil organic matter is another unexpected result. The availability of N is an index that generally relates to tree growth as N is the most limiting nutrient in plant communities (Fisher and Binkley, 2000). Range for N mineralization for the soil depths 0-5, 5-15, 15-30 cm were 13-104, 8-66 and 4-47 mg kg<sup>-1</sup>, in the same order. These ranges for N mineralization are influenced by total soil N and are common for tropical forest soils (Power, 1980). Probably, the poor relationship between N mineralization and SI is explained by the fact that this is the first rotation for the plantation and soils were vegetated with grasses for a long time (40 years) previous to establishment. The organic matter accumulated in the soil surface during that time may have contributed to maintain adequate levels of organic matter. Soil organic matter in the soil surface ranged from 0.5 to 4% and soil N from .05 to 0.34 in the upper 30 cm. The availability of N is influenced by total amount of N and organic matter. It is very likely that the pools of organic carbon in the soil lead to adequate provision of N. On the other hand *Eucalyptus* is highly efficient recycling nutrients (Stape *et al.*, 2004) and the correlation with N mineralization will be evident as N status of the plantations is expected to decrease in subsequent rotations. The importance of N in *Eucalyptus* plantations has been demonstrated in several works, for example, mixed plantations of *Eucalyptus* and leguminous showed higher productivity than monoculture with *Eucalyptus* (Forrester *et al.*, 2006). Even removal of leguminous in the herbaceous stratus of

*Eucalyptus* stands can lead to a deficit of 140 kg<sup>-1</sup>N ha<sup>-1</sup> after seven years of plantations (Laclau *et al.*, 2005). Since these works show that monoculture is not a sustainable system after the first rotation, we speculate that successive rotations in the study sites will be more N limited, leading to a better relationship between tree growth and soil N. Coarse-textured soils with good nutrient status seem to provide the best environments for the productivity of eucalyptus. This trend was also seen by Stape *et al.* (2004) who reported that coarse-textured soil were twice as much responsive to fertilization than sites with finer soil texture.

### 3.6. CONCLUSIONS

Site index (SI) of *Eucalyptus grandis* and *E. urophylla*, were related to soil texture. Sand contents higher than 28% in the 0-5 cm soil depth influenced tree growth. In deeper layers (5-30 cm) this influence started at sand contents higher than 22%. Surface soil sand content explained from 51 to 53% of the SI variation. No correlation was found between soil bulk density measured at three soil depths (0-5, 10-15 and 15-30 cm) and tree growth (SI); probably because adequate soil moisture levels may prevent the soil reaching soil strength values that would impair root growth. Similarly, neither N mineralization nor organic matter content did correlate to soil productivity, which may be explained by the fact that these soils were vegetated with grasses for at least 40 years before the plantations were established, providing enough N to the system; nevertheless subsequent rotations may experience N shortage depending on the management system given to the plantations.

## CAPÍTULO IV. LITERATURA CITADA

- Aparicio, J. L. y J. A. López. 1995. Potencial de *Eucalyptus grandis* en el sudeste de la provincia de Corrientes y algunos factores edáficos relacionados con la producción de madera. *Bosque* 16: 81-89.
- Baca C., J. C. 1998. Evaluación de aptitud de tierras para zonificar terrenos forestales en el Estado de Guerrero. Tesis de Maestría en Ciencias. Universidad Autónoma Chapingo. DICIFO. Chapingo, Edo. de México. 118 p.
- Barcenas A., P. 2002. Determinación de zonas potenciales para el establecimiento de plantaciones de pitahaya (*Hylocereus* spp.). Tesis de Doctorado en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Edo. de México. 145 p.
- Barredo C., J. I. 1996. Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio. RA-MA Editorial. Madrid, España. 259 p.
- Booth, T. H. and L. D. Pryor. 1991. Climatic requirements of some commercially important eucalypt species. *Forest Ecology and Management* 43: 26-31.
- Booth, T. H., H. A. Nix, M. F. Hutchinson and T. Jovanovic. 1988. Niche analysis and tree species introduction. *Forest Ecology and Management* 23: 47-59.
- Braimoh, A. K., P. L. G. Vlek y A. Stein. 2004. Land evaluation for maize based on Fuzzy set and interpolation. *Environmental Management* 33: 226-238.
- Burrough, P. A. 1989. Fuzzy mathematical methods for soil survey and land evaluation. *Journal of Soil Science* 40:477-492.
- Burrough, P.A. and R. A McDonnell. 1998. Principles of Geographical Information Systems. Oxford University Press, Oxford, 349 p.
- Bustillos H., J. A. 2006. Aptitud de áreas para el establecimiento de plantaciones forestales en Sinaloa. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Edo. de México. 109 p.
- Carmean, W. H. 1975. Forest site quality evaluation in the United States. *Advances in Agronomy* 27: 209-269.
- Ceballos-Silva, A. y 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. *Agriculture Systems* 77: 117-136.

- Chirici, G., P. Corona, M. Marchetti, D. Travaglini y U. Wolf. 2002. Modello di valutazione dell'attitudine fisica del territorio per la realizzazione di piantagioni di noce comune e di douglasia in Italia meridionale. *Monti e Boschi* 6: 25-31.
- Cieszewski, C. J. 2001. Comparing fixed-and variable-base-age site equations having single versus multiple asymptotes. *Forest Science* 48: 7-23.
- Clark Labs, 2003. IDRISI version 14.0 Kilimanjaro. Geographic Analysis and Image Processing Software, Worcester, MA. USA.
- Clutter, L. J., C. J. Fortson, V.L. Pienaar and L.R. Bailey. 1983. Timber management. A quantitative approach. Wiley, New York. 333 p.
- CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad). 1998. Obtención de metadatos y cartografía en línea: <http://conabioweb.conabio.gob.mx/metacarto/metadatos.pl>. Acezada en junio de 2006
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). 2003. Plantaciones forestales comerciales. [http://www.conafor.gob.mx/programas\\_nacionales\\_forestales/prodeplan/marco\\_prodeplan.htm](http://www.conafor.gob.mx/programas_nacionales_forestales/prodeplan/marco_prodeplan.htm). Accesada en junio 2005.
- CONAFOR 2001. Programa Nacional Forestal 2001–2006. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México D. F. 118 p.
- Dutch, G. J., C. A. Bayona, L.C. Labra y V. A. Gama. 1981. Sistema de evaluación de tierras para la determinación del uso agropecuario y forestal de México. *Revista de Geografía Agrícola* 1: 21-46.
- Eastman, J. R. 2003. IDRISI for Windows ver. Kilimanjaro. Tutorial. Clark University. Worcester, MA. USA. 270 p.
- Elineema, R. R. 2002. Análisis del método AHP para la toma de decisiones multicriterio. Tesis de Maestría en Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. 96 p.
- Escalante R., F. y S. Monreal R. 2002. Plantations in Mexico. En: XXI Session of the North American Forest Commission. Plantations Technical Paper Group. pp: 3-6.
- ESRI Inc., 2001. ArcGIS 8.1. ESRI® U. S. A.
- ESRI Inc., 2002. ArcGIS 8.2. ESRI® U. S. A.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 1958. Elección de especies arbóreas para plantación. Cuadernos de Fomento Forestal N° 13 Roma. Italia. 100 p.

- FAO. 1976. A framework for land evaluation. FAO Soils Bulletin No.32. Rome, Italy. 71 p.
- FAO. 1981. El eucalipto en la repoblación forestal. Roma, Italia. 723 p.
- FAO. 1985. Evaluación de tierras para la agricultura de secano. Boletín de Suelos de la FAO 52. Roma, Italia. 228 p.
- FAO. 1997. Zonificación agro-ecológica. Guía General. Boletín de Suelos de la FAO No. 73. Roma, Italia. 82 p.
- FAO. 2000. The crop environmental requirements database (Ecocrop). En: Plant Production and Protection Division of FAO (AGPC). Versión Internet: Accesada en Julio de 2006- <http://ecocrop.fao.org>.
- Fassbender, L. 1985. Química de suelos. Instituto InterAmericano de Cooperación para la Agricultura. San José, Costa Rica. 125 p.
- Fierros G., A. M. y V. Sosa C.. 2000. Las plantaciones forestales comerciales en México: El programa para el desarrollo de plantaciones forestales comerciales (PRODEPLAN). En: Memorias del 1er. Congreso Nacional de Reforestación. Montecillo, México. PRONARE /SEMARNAP, CD. 15 p.
- Fisher, R. F. and D. Binkley. 2000. Ecology and management of forest soils. 3rd ed. Wiley. USA. 489 p.
- Flores A., E. y F. Moreno S. 1994. Potencial productivo para el establecimiento de plantaciones forestales de *Pinus radiata* en el Estado de México. En: IV Reunión Nacional de Plantaciones Forestales. (Memoria). INIFAP. México, D.F. pp.: 143-150.
- Forrester, D. I., J. Bauhus, A. L. Cowie, P. A. Mitchell and J. Brockwell. 2006. Productivity of three young mixed-species plantations containing N<sub>2</sub>-fixing *Acacia* and non-N<sub>2</sub>-fixing *Eucalyptus* and *Pinus* trees in south-eastern Australia. *Forest Ecology and Management* 233: 275-284.
- García N., H., D. R. García, R. Moreno S., J. López B. y M. de L. Villers R. 2001. Enfoques Fuzzy y Booleano convencional para clasificar la aptitud agrícola de las tierras. *Agricultura Técnica en México* 27(2): 107-118.
- García N., H., R. Moreno S., J. López B., M. de L. Villers R. y R. R. García D. 2004. El enfoque de límites difusos (Fuzzy) para la clasificación de tierras en especies sin datos de producción. *Agricultura Técnica en México* 30(1): 5-17.
- Golfari L. 1985. Distribución regional y condiciones ecológicas de los eucaliptos cultivados en la Argentina. Problemas inherentes. Publicación N°1. Centro de Investigaciones y Experiencias Forestales (CIEF). Argentina. 19 p.

- Gomez, A., R. F. Powers, M. J. Singer and W. R. Horwath. 2002. Soil compaction effects on growth of young ponderosa pine following litter removal in California's Sierra Nevada. *Soil Science Society of America Journal* 66: 1334-1343.
- Gómez, T. J. 2006. Índice de sitio y rendimiento maderable en una plantación comercial de *Eucalyptus grandis* Hill Ex Maiden y *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake, en el norte del Estado de Oaxaca. Tesis de Doctorado en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Edo. de México. 56 p.
- Gonçalves, J. L. M., N. F. Barros, E. K. S Nambiar and R. F. Novais. 1997. Soil and stand management for short-rotation plantations. *In: Management of soil, nutrients, and water in tropical plantation forester*, E. K. S. Nambiar and A. G. Brown (eds.). ACIAR monograph Canberra 43: 397-417.
- Gonçalves, J. L. M., L. I. Dematte J. y do Couto. 1990. Relacoes entre productivida de sitios florestais de *Eucalyptus gradis* e *Eucalyptus saligna* com as propriedades de alguns solo de textura arenosa e media no Estado de Sau Paulo. IPEF. Piracicaba 43/44: 24-39.
- Hartney, V. J. 1995. Vegetative propagation of the eucalyptus. *Australian Forest Research* 10:191-211.
- INDUFOR Ltd. y CONFORA S.A. de C.V. 2003. Memoria Confidencial de Inversión Proyecto de Plantaciones Forestales Comerciales. Plantaciones de Tehuantepec A. C. (PLANTEH), Oaxaca , México. 64 p.
- INEGI (Insituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2005. Sistema de Descarga del Continuo de Elevaciones Mexicano. <http://mapserver.inegi.gob.mx>. Accesada en julio del 2005.
- Kiviste A., J., A. Alboreca R. y D. R. González A. 2002. Funciones de crecimiento en el ámbito forestal. *Comunicaciones INIA. Serie: Recursos Naturales. No. 4.* 189 p.
- Laclau, J. P., J. Ranger, P. Deleporte, Y. Nouvellon, L. Saint- Adre, S. Martel and J. P. Bouillet. 2005. Nutrient cycling in a clonal stand of Eucalyptus and an adjacent savanna ecosystem in Congo. 3. Input-output budgets and consequences for the sustainability of plantations. *Forest Ecology and Management* 210: 375-395.
- Lawrence Berkeley Laboratory. 1992. Report lbl-32665., University of California. Berkeley, California, 1992. USA.
- Lemma, B., D. B. Kleja, I. Nilsson, and M. Olsson. 2006. Soil carbon sequestration under different exotic tree species in the southwestern highlands of Ethiopia. *Geoderma* 136: 886-898.

- Lieth, H. 1975. Modeling the primary productivity of world. *In* : Primary Productivity of the Biosphere. H Lieth and R. H. Wihittaker (eds.). Springer Verlag, New York. pp: 237-263
- Lima, A. M. N., I. R. Silva, J. C. L. Neves, R. F. Novais, N. F. Barros, E. S. Mendonza, T. J. Smyth, M. S. Moreira and F. P. Leite. 2006. Soil organic carbon dynamics following afforestation of degraded pastures with eucalyptus in southeastern Brazil. *Forest Ecology and Management* 235: 219-231.
- Malczewski, J. 1999. GIS and multicriteria decision analysis. John Wiley and Sons. New York. 392 p.
- Malczewski, J. 2004. GIS-based land-use suitability analysis: a critical overview. *Progress in Palanning* 62:3-65.
- Malczewski, J., 1996. A GIS-based approach to multiple criteria group decision making. *International Journal of Geographical Information Systems* 10 (8): 955–971.
- Marionni, O. 2004. Implementation of the analytical hierarchy process with VBA in ARCGIS. *Computers & Geosciences* 30: 637-647.
- Masera, O., M .J. Ordóñez y R. Dirzo. 1992. Emisiones de carbón a partir de la deforestación en México. *CIENCIA: Revista de la Academia de la Investigación Científica* 43: 151 p.
- McBratney, A. B. and I. O. A. Odeh. 1997. Application of Fuzzy sets in soil science: Fuzzy logic measurement and Fuzzy decisions. *Geoderma* 77:85-113.
- McKenney, D. W. and J. H. Pedlar. 2003. Spatial models of site index based on climate and soil properties for two boreal tree species in Ontario, Canada. *Forest Ecology and Management* 175: 497-507
- Mendoza B., M. A. 1993. Conceptos básicos de manejo forestal. Uteha Noriega Editores. México, D.F. 161 p
- Meza S., R. 2001. Áreas potenciales para el establecimiento de plantaciones de Neem (*Azadirachta indica* A. Juss.) en Baja California Sur. En: Memorias del 1er Congreso Nacional de Reforestación. Montecillo, México. PRONARE /SEMARNAP, CD. 15 p.
- Meza S., R. 2003. Identificación de áreas con potencial productivo para damiana en Baja California Sur. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional del Noroeste. Campo Experimental Todos Santos. Folleto Científico No. 2. 28 p.

- Moreno S., R., F. Moreno S. y G. Cruz B. 1994. Determinación de áreas potenciales para plantaciones forestales. En: IV Reunión Nacional de Plantaciones Forestales. (Memoria). INIFAP. México, D.F. pp: 180-186.
- Olivas G., U. E. 2006. Aptitud de áreas para el establecimiento de plantaciones forestales en el Estado de Durango. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Edo. de México. Méx. 166 p.
- Paz M., F. 1995. Selvas tropicales y deforestación. Apuntes para la historia reciente del trópico húmedo mexicano. *In*: M. F. Paz (Coord.). De bosques y gente. Aspectos sociales de la deforestación en América Latina. Cuernavaca, Morelos. CRIM, UNAM. pp. 53-87.
- Pérez-Vera, O. A., M. de J. Yañez-Morales, D. Alvarado-Rosales, D. Cibrian-Tovar y S. García-Díaz. 2005. Hongos asociados a Eucalipto, *Eucalyptus grandis* Hill: Maid. *Agrociencia* 39:311-318.
- Powers, R. F. 1980. Mineralizable soil nitrogen as an index of soil nitrogen availability to forest trees. *Soil Science Society of America Journal* 44:1314-1320.
- Powers, R. F. 1999. On the sustainability productivity of planted forests. *New Forest* 17: 253-306.
- Prado D., J. A. y A. Barros S. 1989. *Eucalyptus*. Principios de silvicultura y manejo. Instituto Forestal División Silvicultura. Santiago, Chile. 199 p.
- Prakash, T. N. 2003. Land suitability analysis for agricultural crops: A Fuzzy multicriteria decision making approach. M. Sc. Thesis. International Institute for Geo-information Science and Earth Observation (ITC). Enschede, The Netherlands. 57 p.
- Pritchett, W. L. 1990. Suelos forestales: propiedades, conservación y mejoramiento. Limusa. México, D. F. 634 p.
- Rivera Z., J. 2003. Zonas con aptitud edafoclimática para el cultivo de Hule (*Hevea brasiliensis* Muell Arg.) e incidencia de la enfermedad sudamericana de la hoja en el estado de Tabasco, México. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Edo. de México, Méx. 96 p.
- Rowell, D. L. 1994. Soil science, methods and applications. Longman Scientific and Technical. UK. 67 p.
- Saaty, T. L. 1980. The analytic hierarchy process. McGraw-Hill. U.S.A. 269 p.
- SAS, Institute 1998. SAS User Guide. SAS Institute Inc., Cary, NC. 595 p.

- Schönau, A.P.G., R. Themaat and D. I. Verloren Von. 1984. The importance of complete site preparation and fertilizing in the establishment of *Eucalyptus grandis*. South African Journal of Forestry 116: 1-10.
- SEMARNAT. 1996. Programa Forestal y de Suelo 1995-2000. Dirección General de comunicación Social SEMARNAP. México. 79 p.
- SEMARNAP. 2000. Inventario Nacional Forestal 2000-2001. Cartas inv\_E157f, inv\_E1510f e inv\_E1514f
- SEMARNAT. 2002. Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana escala 1:250,000. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales-Colegio de Postgraduados. Memoria Nacional. 68 p.
- Soil Survey Staff, U.S.D.A. 1997. Keys to Soil Taxonomy. 7th Ed. Soil Conservation Service. U. S. Department of Agriculture. Blacksburg, Virginia, USA. 545 p.
- Spurr, S. H. y B. V. Barnes. 1980. Forest Ecology. 2nd. ed. Ronald Press. New York. 571 p.
- Stape, J. L., D. Binkley, S. Jacob, and E. N. Takahashi. 2006. A twin-plot approach to determine nutrient limitation and potential productivity in *Eucalyptus* plantations at landscape scales in Brazil. Forest Ecology and Management 223: 358-362.
- Stape, J. L., D. Binkley, y M. G. Ryan, 2004. Eucalyptus production and the supply, use and efficiency of use of water, light and nitrogen across a geographic gradient in Brazil. Forest Ecology and Management 193: 17-31.
- Van Ranst, E., H. Tang, R. Groenemans, and S. Sinthurahat. 1996. Application of Fuzzy logic to land suitability for rubber production in peninsular Thailand. Geoderma 70: 1-19.
- Zadeh, L. H. 1965. Fuzzy sets. Information and Control 8:338–353.
- Zinn, Y. L., D. V. S. Resck and J. E. Silva. 2002. Soil organic carbon as affected by afforestation with *Eucalyptus* and *Pinus* in the Cerrado region of Brazil. Forest Ecology and Management 166: 285-294.

## ANEXO 1

Cuadro A.1 Ponderaciones y consistencias obtenidas de las encuestas a expertos.

Experto	Subcriterios															
	Criterios					Clima			Suelo			Topografía				
	Clima	Suelo	Topo- grafía	IC	Preci- pitación	T. máxima	T. mínima	T. media anual	IC	Textura	Profundidad	pH	IC	Altitud	Pendiente	IC
1	0.71	0.22	0.67	0.52	0.58	0.23	0.13	0.05	0.11	0.65	0.22	0.13	0.25	0.75	0.25	<b>0.00</b>
2	0.29	0.66	0.05	<b>0.07</b>	0.42	0.22	0.05	0.31	<b>0.04</b>	0.32	0.57	0.11	0.25	0.83	0.17	<b>0.00</b>
3	0.60	0.20	0.20	<b>0.00</b>	0.46	0.15	0.31	0.07	<b>0.04</b>	0.32	0.14	0.11	0.25	0.50	0.50	<b>0.00</b>
4	0.48	0.41	0.11	<b>0.03</b>	0.43	0.11	0.17	0.29	<b>0.07</b>	0.20	0.57	0.20	<b>0.06</b>	0.50	0.50	<b>0.00</b>
5	0.51	0.39	0.10	<b>0.07</b>	0.33	0.31	0.31	0.04	<b>0.00</b>	0.15	0.56	0.29	0.38	0.50	0.50	<b>0.00</b>
6	0.75	0.18	0.07	<b>0.03</b>	0.64	0.12	0.21	0.03	0.16	0.18	0.06	0.75	0.25	0.88	0.13	<b>0.00</b>
7	0.22	0.73	0.05	0.48	0.65	0.06	0.06	0.23	<b>0.06</b>	0.24	0.70	0.06	0.25	0.13	0.88	<b>0.00</b>
8	0.17	0.74	0.09	0.20	0.69	0.13	0.17		<b>0.07</b>	0.06	0.45	0.49	<b>0.01</b>	0.50	0.50	<b>0.00</b>
9	0.17	0.74	0.09	0.20	0.59	0.09	0.17	0.15	0.23	0.60	0.20	0.20	<b>0.00</b>	0.25	0.75	<b>0.00</b>
10	0.30	0.62	0.09	0.12	0.56	0.12	0.27	0.04	0.32	0.06	0.70	0.24	0.25	0.17	0.83	<b>0.00</b>
11	0.71	0.22	0.07	0.52	0.66	0.08	0.08	0.19	<b>0.03</b>	0.26	0.64	0.10	<b>0.03</b>	0.50	0.50	<b>0.00</b>
Promedios	0.53	0.37	0.11		0.52	0.15	0.17	0.19		0.28	0.46	0.25		0.50	0.50	
Ponderación	<b>0.53</b>	<b>0.37</b>	<b>0.11</b>		<b>0.51</b>	<b>0.15</b>	<b>0.16</b>	<b>0.18</b>		<b>0.28</b>	<b>0.47</b>	<b>0.25</b>		<b>0.50</b>	<b>0.50</b>	