

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**



**EVALUACIÓN DE PLANTACIONES FORESTALES Y DETERMINACIÓN  
DE ÁREAS POTENCIALES PARA SU ESTABLECIMIENTO CON  
TÉCNICAS GEOMÁTICAS EN EL SUR DE OAXACA**

**POR**

**PRUDENCIA CABALLERO CRUZ**

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRÍA EN CIENCIAS FORESTALES**

**JULIO, 2018**

**EVALUACIÓN DE PLANTACIONES FORESTALES Y DETERMINACIÓN DE  
ÁREAS POTENCIALES PARA SU ESTABLECIMIENTO CON TÉCNICAS  
GEOMÁTICAS EN EL SUR DE OAXACA**

Aprobación de Tesis



---

Dr. Eduardo J. Treviño Garza  
Director



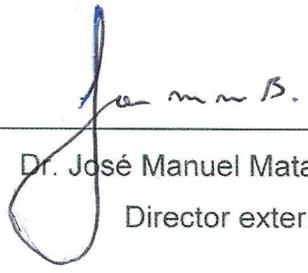
---

Dr. Oscar A. Aguirre Calderón  
Codirector



---

Dr. Horacio Villalón Mendoza  
Asesor



---

Dr. José Manuel Mata Balderas  
Director externo

Linares, N. L. Julio, 2018

## **Agradecimientos**

A la **Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León**, por haberme aceptado en su programa de Maestría en Ciencias Forestales.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)** por la beca que me otorgó para realizar la maestría.

A la **Comisión Nacional Forestal** y al Gerente Estatal de la CONAFOR de Oaxaca Ing. Carlos René Estrella Canto, por su amabilidad de ceder la información de la localización de las plantaciones.

Al **Geóg. Carlos A. Guerrero Elemen**, Director General De Geografía y Medio Ambiente en el INEGI y a la Lic. Alejandra Cervantes Martínez, Coordinadora Estatal del INEGI en Nuevo León por las atenciones recibidas en la obtención de algunas imágenes de satélite.

Al **Dr. Eduardo J. Treviño Garza**, por haber confiado en mí y haberme aceptado para formar parte de su equipo de trabajo, por su gran asesoramiento para la elaboración de esta tesis y por su gran ayuda en mi formación.

Al **Dr. Oscar A. Aguirre Calderón**, por haber aceptado formar parte de esta investigación y por sus acertados comentarios para la elaboración de esta tesis.

Al **Dr. Horacio Villalón Mendoza**, por sus valiosos consejos en la elaboración de esta tesis y aceptar en formar parte del comité de tesis.

Al **Dr. José M. Mata Balderas**, por aceptar en formar parte del comité de tesis.

A los profesores de esta facultad por contribuir en mi formación académica y al equipo del Laboratorio de Geomática de la Facultad por sus consejos.

A todos... ¡Muchas Gracias!

## **Dedicatorias**

A mis padres, por sus sabios consejos, su aliento y todo el apoyo incondicional que siempre me han brindado.

A mis herman@s, por todos los momentos que hemos vivido desde niñ@s y que forman una parte importante de mi vida.

A mis amig@s y compañer@s por los consejos y conocimientos compartidos.

A Dios, por darme esta vida y ayudarme a vivirla.

## ÍNDICE

	<b>Página</b>
Índice de tablas.....	iii
Índice de figuras.....	iii
RESUMEN.....	iv
ABSTRACT.....	v
CAPÍTULO I.....	1
1. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Antecedentes.....	3
1.2.1 Las plantaciones forestales comerciales.....	3
1.2.2 Uso de los sistemas de información geográfica y de los sensores remotos en el manejo de los recursos naturales.....	4
1.2.3 Índices de Vegetación.....	4
1.2.4 Análisis multivariado.....	5
1.2.5 Lógica difusa.....	6
1.2.6 Análisis multicriterio.....	8
1.2.6.1 Proceso de Jerarquía Analítica.....	9
1.3 Justificación.....	13
1.4 Hipótesis.....	14
1.5 Objetivo del trabajo.....	15
1.5.1 Objetivo general.....	15
1.5.2 Objetivos particulares.....	15
CAPÍTULO II.....	16
2. MONITOREO DE LAS PLANTACIONES FORESTALES COMERCIALES A TRAVÉS DE LOS SENSORES REMOTOS EN OAXACA.....	16
2.1 Resumen.....	16
2.2 Abstract.....	17
2.3 Introducción.....	18
2.4 Materiales y métodos.....	20



## Índice de tablas

Tabla 1. Escala de Saaty.....	10
Tabla 2. Clasificación de los valores del NDVI.....	24
Tabla 3. Áreas óptimas para el establecimiento de plantaciones (escenario 1).46	
Tabla 4. Áreas óptimas para el establecimiento de plantaciones (escenario 2).47	

## Índice de figuras

Figura 1. Ubicación del área de estudio.....	21
Figura 2. Series del NDVI de las plantaciones de la región tropical.....	27
Figura 3. NDVI de las plantaciones de la región templada. ....	29
Figura 4. Análisis multivariado: índices de vegetación vs variables ambientales (plantaciones de la región tropical). ....	30
Figura 5. Análisis multivariado: índices de vegetación vs variables ambientales (plantaciones de la región templada). ....	31
Figura 6. Ubicación del área de estudio correspondiente a PFC.....	37
Figura 7. Áreas con alto potencial para las especies forestales maderables....	48

## RESUMEN

Se presenta un marco metodológico para el monitoreo de las plantaciones forestales comerciales y el mapeo de áreas óptimas para el establecimiento de plantaciones mediante el uso de información geoespacial en el estado de Oaxaca. Se emplearon técnicas para el procesamiento de imágenes de satélite, análisis de datos y modelación espacial. En el Capítulo I se presenta información sobre las plantaciones forestales, las técnicas geomáticas para el monitoreo de la vegetación, así como la técnica de análisis multicriterio (Proceso Jerárquico Analítico) y la lógica difusa para la determinación de aptitud de tierras. En el Capítulo II se analizó la dinámica de las plantaciones en el periodo 2014-2016 mediante el uso de imágenes de satélites y posteriormente se determinaron los factores que influyen en el desarrollo de las plantaciones mediante un análisis multivariante. A través de la evaluación del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado se encontró que la respuesta de la vegetación correspondiente a las plantaciones es favorable. En el Capítulo III se estudió la aptitud del terreno para tres especies de latifoliadas y tres especies de coníferas a través de una modelación espacial multicriterio, con ello se encontraron áreas adecuadas para el establecimiento de las especies. Los métodos empleados en este trabajo ayudan a analizar y conocer la situación de las plantaciones y a encontrar áreas potenciales productivas para las especies forestales con la finalidad de que los proyectos de plantaciones comerciales sean exitosos.

**Palabras clave:** Geomática, sensores remotos, modelación, Oaxaca.

## ABSTRACT

A methodological framework for the monitoring of commercial forest plantations and the mapping of optimal areas for the establishment of plantations through the use of geospatial information in the state of Oaxaca is presented. Techniques were used for satellite image processing, data analysis and spatial modeling. Chapter I presents information on forest plantations, geomatics techniques for vegetation monitoring, as well as the multicriteria analysis technique (Analytical Hierarchical Process) and the fuzzy logic for determining land aptitude. In Chapter II, the dynamics of plantations in the 2014-2016 period were analyzed through the use of satellite images and subsequently the factors that influence the development of the plantations were determined through a multivariate analysis. Through the evaluation of the Normalized Difference Vegetation Index, it was found that the response of the vegetation corresponding to the plantations is favorable. In Chapter III, the aptitude of the soil for 3 hardwood species and 6 softwood species was studied through a multicriterial spatial modeling, thus finding suitable areas for the establishment of the species. The methods used in this work help to analyze and know the situation of the plantations and to find potential productive areas for the forest species in order that commercial plantation projects are profitable.

**Keywords:** Geomatic, remote sensing, modeling, Oaxaca.

# CAPÍTULO I

## 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

### 1.1 Introducción

La economía en expansión, la globalización de los mercados, el crecimiento de la población, los conflictos sociales y el cambio climático están aumentando la presión sobre los recursos relacionados con el suelo y los bosques para cubrir necesidades de la sociedad, estos factores traen consigo problemas como la fragmentación de los ecosistemas, la pérdida de biodiversidad, el deterioro de los recursos naturales (Sandewall et al., 2015).

Ante esta problemática y con el objetivo de cubrir la demanda de madera en el mercado se ha recurrido al establecimiento de plantaciones forestales con especies nativas y exóticas, esto ayuda a brindar servicios de protección como la conservación del suelo y la biodiversidad a largo plazo (Stephens & Grist, 2014). Sin embargo, el desarrollo sostenible de plantaciones afronta una serie de retos económicos, ambientales y sociales, y requiere de medidas enérgicas por parte de los principales actores, como son los gobiernos o los inversores estratégicos y financieros (Barua, Lehtonen & Pahkasalo, 2014).

En México se han establecido aproximadamente 200 mil ha de plantaciones mediante el otorgamiento de subsidios a personas físicas y morales. Existe una superficie de 13.9 millones de ha con condiciones adecuadas para el desarrollo de plantaciones forestales, lo que representan una opción para que las especies que tienen un valor económico elevado por su madera, puedan ser producidas en las cantidades que se demandan en el mercado, promoviendo principalmente el uso de las especies nativas maderables, así también se reactiva la economía de las comunidades rurales (Sosa et al., 2015).

Se tiene como objetivo evaluar el éxito de las plantaciones forestales mediante técnicas geomáticas, determinar los factores ambientales que influyen en el desarrollo de los mismos e identificar áreas con potencial productivo para el establecimiento de plantaciones comerciales con especies nativas en la región de clima tropical y templada considerando los factores climáticos, edafológicos y topográficos mediante un análisis multicriterio con el propósito de proporcionar una herramienta que ayude a la toma de decisiones a nivel regional. Este trabajo se presenta en tres capítulos.

En el Capítulo I, “Introducción general” se aborda aspectos generales de las plantaciones forestales a nivel mundial y nacional, el uso de los sistemas de información geográfica y la percepción remota como herramienta en el manejo de los recursos naturales, los índices de vegetación, el análisis multivariado, la lógica difusa y el análisis multicriterio como herramienta de toma de decisiones enfocado a la definición de aptitud de terrenos en el sector forestal.

El Capítulo II, “Monitoreo de las plantaciones forestales comerciales a través de los sensores remotos en Oaxaca” presenta el análisis del éxito de las plantaciones mediante el cálculo de índices de vegetación y los factores ambientales asociados al crecimiento y desarrollo de las plantas para lograr una buena productividad, éste último mediante un análisis multivariante.

El Capítulo III, “Áreas potenciales para el establecimiento de plantaciones forestales comerciales en Oaxaca” describe las áreas óptimas para el establecimiento de las especies forestales maderables nativas de interés económico en la región tropical y templado en el sur del estado mediante el uso de herramientas multicriterio, considerando los requerimientos climáticos, edafológicos y topográficos que demanda cada especie analizada, así como algunas cuestiones de uso de suelo.

En el apartado de conclusiones generales se describen los resultados obtenidos en respuesta a las hipótesis planteadas para los capítulos dos y tres.

## **1.2 Antecedentes**

### **1.2.1 Las plantaciones forestales comerciales**

Las plantaciones forestales comerciales son masas forestales de gran escala, con manejo intensivo, donde comúnmente se hace uso de especies de árboles exóticos de rápido crecimiento, pero también se emplean especies nativas que cuya madera presenta características apreciadas en el mercado (Overbeek, Kröger & Gerber, 2012).

La importancia de las plantaciones forestales radica en que es fuente de materia prima para muchos productos esenciales; es un agente económico que crea empleo, crecimiento económico, desarrollo humano, ayuda a la mitigación del cambio climático, promueven la restauración de los ecosistemas y proveen servicios ambientales. Además, contribuyen al aumento de la producción maderable para el abastecimiento de la industria forestal, ayuda a reducir la presión sobre los bosques naturales, fomenta la inversión privada y social en el sector forestal, y convierte áreas degradadas o improductivas en bosques productivos mejorando al ambiente en general (Guariguata, Arce, Ammour & Capella, 2017; Rodríguez, Pasalodos-Tato, Díaz-Balteiro & McTague, 2014).

El establecimiento de plantaciones es una forma de mitigar la extracción ilegal de madera del bosque natural y reducir la deforestación, es una actividad con objetivos sociales y económicos. Sin embargo, no son incorporados en las agendas nacionales de desarrollo y por lo regular la visión que se tiene es de acuerdo a los periodos de vigencia de los gobiernos presidenciales (Guariguata et al., 2017). Otra problemática que se tiene y que se debe de atender es, la poca atención que se le da a la selección de especies en función al sitio, la deficiente calidad de los plantones y el mantenimiento deficiente de la plantación contra incendios o plagas.

Se destaca que el 75% de las plantaciones forestales se han realizado con especies nativas y el 25% con especies introducidas. Hasta el 2014, el este de Asia, Europa y Norteamérica reportaban la superficie más grande de plantaciones forestales, sumando el 75 % de las plantaciones que existen a nivel global, aportando un poco más de un tercio de la madera rolliza destinada al uso industrial (Cubbage et al., 2014; De Moraes-Gonçalves, Duque-Silva, Behling & Alcarde-Alvares, 2014).

### **1.2.2 Uso de los sistemas de información geográfica y de los sensores remotos en el manejo de los recursos naturales**

Los sistemas de información geográfica y la percepción remota son herramientas que se han empleado en la toma de decisiones, en la gestión y el manejo de los recursos naturales con la finalidad de ser más eficaces y eficientes en el desarrollo de diversas actividades relacionadas con el medio ambiente.

Estas herramientas tienen una amplia aplicación en el sector ambiental, son útiles para clasificar y mapear las condiciones de sitios y la vegetación del bosque, ayuda a reflejar las condiciones ambientales de la tierra, los tipos de bosque, las etapas de regeneración, la edad de la vegetación, entre otros, y ayudan a representar los resultados en mapas facilitando la interpretación de los resultados (Ryzhkova, Danilova & Korets, 2016; Ryzhkova & Danilova, 2012). También permiten determinar zonas más propensas a la deforestación, áreas con las mejores características para llevar a cabo una actividad específica, permiten resolver problemas complejos mediante la teoría de toma de decisiones (Gayen & Saha, 2017).

### **1.2.3 Índices de Vegetación**

Los métodos basados en sensores remotos para la estimación de biomasa se pueden agrupar en modelos de algoritmos de regresión (estadística) y de

aprendizaje automático, así como índices espectrales (Ali, Cawkwell, Dwyer, Barrett & Green, 2016). Existen diferentes índices de vegetación que se calculan mediante el uso de las imágenes de satélite, el más común es el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado (NDVI por sus siglas en inglés), el cual es empleado para examinar el vigor, el crecimiento de la vegetación, la salud y la biomasa desde la década de 1970; este índice es expresado como la diferencia entre la banda infrarroja cercana y la banda roja, y la suma de las mismas (Liu et al., 2014; Thapa, Thoms & Parsons, 2016; Ullah, Schlerf, Skidmore, Shafique & Iqbal, 2012; Zhao et al., 2014).

Además del NDVI, se han empleado otros índices de vegetación (IV) para evaluar la biomasa como: el índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI), el índice modificado de vegetación ajustada al suelo (MSAVI), el índice de vegetación mejorado (EVI), el índice de vegetación de banda estrecha, el Índice de Humedad de Diferencia Normalizada (NDWI), este último evalúa la cantidad de agua o la humedad disponible en la vegetación de una superficie (Jacques, Kergoat, Hiernaux, Mougin & Defourny, 2014; Sakowska, Juszczak & Gianelle, 2016).

El EVI puede mejorar la sensibilidad a las áreas de vegetación alta, donde la saturación de NDVI ocurre en un índice de área foliar de 2.0-2.5 (Huete et al., 2002). El MSAVI puede reducir la influencia del fondo del suelo (Gilbert, González-Piqueras, García Haro & Meliá, 2002). Sin embargo, la mayoría de los estudios involucran modelos estadísticos basados en un solo índice de vegetación, y cada uno tiene sus propias limitaciones e incertidumbres (Zhao et al., 2014).

#### **1.2.4 Análisis multivariado**

El análisis multivariante involucra un conjunto de métodos estadísticos y matemáticos, destinados a describir e interpretar los datos que provienen de la observación de varias variables estadísticas estudiadas conjuntamente; analiza,

representa e interpreta los datos que resultan de observar más de una variable estadística sobre una muestra de individuos. Las variables observables son homogéneas y correlacionadas, sin que alguna predomine sobre las demás. La información estadística en análisis multivariante es de carácter multidimensional, por lo tanto, la geometría, el cálculo matricial y las distribuciones multivariantes juegan un papel fundamental. En este tipo de estadística no hay una variable de respuesta y lo que se busca es estructurar los datos (Crawley, 2013; Cuadras, 2014).

Una de las técnicas multivariantes muy aplicado en la ecología es el análisis de correspondencia canónica (ACC), éste es un tipo de análisis estadístico lineal de múltiples variables descrito inicialmente por Hotelling (1935), éste permite analizar relaciones multidimensionales entre múltiples variables independientes y múltiples variables dependientes, por ejemplo en el sector forestal se correlacionan los factores ambientales y las especies de plantas (Badii, Castillo, Cortez, Wong & Villalpando, 2007).

El análisis de correlación canónica trata con la asociación entre los conjuntos de variables múltiples dependientes e independientes. Por ello, desarrolla varias funciones canónicas que maximizan la correlación entre combinaciones lineales, también conocidas como valores teóricos canónicos, que son conjuntos de variables dependientes e independientes. Cada función canónica se basa realmente en la correlación entre dos valores teóricos canónicos, un valor teórico para las variables dependientes y otro para las variables independientes. Otra característica única de la correlación canónica es que se obtienen los valores teóricos de forma que se maximiza su correlación (Badii et al., 2007).

### **1.2.5 Lógica difusa**

El sistema de inferencia difusa es una herramienta científica que permite la simulación de un sistema sin una descripción matemática detallada, el cual tienen

cuatro etapas, estos son: 1) Fuzzificación, 2) Aplicación de la base de reglas a datos borrosos, 3) Inferencia de resultados difusos y 4) Defuzzificación (Bojadziev & Bojadziev, 2007; Gray et al., 2013).

De acuerdo con Sami, Shiekhdavoodi, Pazhohanniya & Pazhohanniya (2014), el proceso de fuzzificación define entradas, salidas y sus respectivas funciones de membresía. En esta etapa, los valores numéricos reales de las variables de entrada y salida se transforman en una calificación de membresía a un conjunto difuso, que describe la propiedad de la variable a la forma difusa utilizando funciones de membresía, mapeando cada punto en el espacio de entrada con un valor de membresía entre 0 y 1. Se pueden usar muchos tipos de curvas para funciones de membresía, están totalmente divididos en funciones lineales y en forma de S.

Las reglas del conjunto difuso pueden expresarse cuantitativamente de muchas maneras al elegir una representación matemática específica de los operadores AND, OR y los compensatorios (Ross, 2009; Sami et al., 2014).

Los datos de salida de la base del razonamiento son valores difusos que en la etapa de defuzzificación se transforman en datos reales. Los diversos métodos existentes para la defuzzificación consideran la forma de los números difusos, la longitud de los intervalos de soporte, la altura de las funciones de pertenencia triangulares y trapezoidales, la cercanía a los números triangulares centrales y la complejidad de los cálculos. Alguno de los métodos de defuzzificación más comunes son: Centro Máximo (CoM), la Media del Máximo (MoM) y el Centro de Área (CoA) o Centro de Gravedad (CoG) (Maldonado et al., 2016; Sami et al., 2014).

Con estos métodos, la lógica difusa simula las habilidades humanas para tomar decisiones y manejar situaciones ambiguas donde las matemáticas tradicionales son ineficaces (Liu, 2007; Ross, 2009); por lo que la teoría de los conjuntos se

desarrolló como una forma de representar la naturaleza imprecisa de la información en la vida cotidiana (Berkes y Berkes, 2009).

### **1.2.6 Análisis multicriterio**

La toma de decisiones utilizando la evaluación multicriterio agrupa y hace uso de diversos conceptos, modelos, métodos y aproximaciones para auxiliar a los tomadores de decisiones para ordenar, jerarquizar, describir, evaluar, seleccionar o rechazar objetivos en función de varios criterios respetando las reglas de decisiones, puntuaciones, valores y ponderaciones (Colson y De Bruyn, 2014); por lo que este método involucra un conjunto de técnicas que apoyan en el proceso de toma de decisiones dentro de una amplia variedad de posibilidades mediante la elección de alternativas basadas en criterios concretos.

La evaluación multicriterio ayuda a resolver problemas complejos, permite diseñar modelos de adecuación óptima de diferentes usos y ocupaciones del suelo, así como combinar diferentes objetivos y criterios en un entorno informático de sistema de información geográfica (SIG) basado en información ráster (Dragičević, Dujmović & Minardi, 2018).

La disponibilidad y el uso de datos geográficos digitales junto con técnicas de toma de decisiones multicriterio han permitido el desarrollo de análisis que contribuyen en la planificación acerca del uso de terrenos (López-Marrero, González-Toro, Heartsill-Scalley & Hermansen-Báez, 2011).

Se han desarrollado diferentes métodos de análisis de decisión de criterios múltiples (MCDA) para manejar grandes cantidades de información y respaldar la toma de decisiones complejas con objetivos múltiples (Bunruamkaew y Murayama, 2011; Jhariya, Kumar, Gobinath, Diwan & Kishore, 2016; Pukkala, 2002); uno de los métodos más importante de MCDA es el enfoque de Jerarquía Analítica (AHP).

### **1.2.6.1 Proceso de Jerarquía Analítica**

El proceso de jerarquía analítica (AHP) es un método de toma de decisiones multicriterio, se aplica para analizar la estructura del problema y obtener los pesos de los criterios cualitativos y cuantitativos, incorporando los valores de incertidumbre en la toma de decisiones (Hanine, Boutkhoul, Agouti & Tikniouine, 2017).

El AHP es fácil de entender y puede manejar datos tanto cualitativos como cuantitativos. Además, su uso no implica matemáticas engorrosas. Sin embargo, aunque el objetivo del AHP es captar el conocimiento experto, sin embargo no refleja verdaderamente los procesos cognitivos humanos, especialmente en el contexto de problemas que no están completamente definidos y / o problemas que involucran datos inciertos (Fu, Yeh & Ma, 2017) motivo por el que en la actualidad se combina con la lógica de los conjuntos difusos.

El Proceso de Jerarquía Analítica, se usa ampliamente para identificar el peso o la importancia de los factores. Una de sus características principales es que incluye una medida para evaluar cualquier inconsistencia que se llegara a presentar en los juicios durante la toma de decisiones (Aguarón y Moreno, 2003; Lam y Chin, 2005; Saaty, 1980).

En el sector forestal el AHP ayuda a crear mapas de susceptibilidad específica de cobertura del suelo basado en reglas que asocian los criterios medioambientales a los fenómenos estudiados. Estas reglas pueden integrar técnicas estadísticas con un análisis supervisado del modelo (Follador, Villa, Paegelow, Renno & Bruno, 2008). AHP usa un proceso matemático para manejar los juicios subjetivos de un individuo o grupo en un proceso de toma de decisiones y esta técnica consiste de cuatro pasos y se describen en seguida (Moreno, 2002; Qu et al., 2018; Vaidya y Kumar, 2006):

1. Establecer la jerarquía de criterios y alternativas.
2. Hacer comparaciones por pares de los criterios, y estimar los pesos de los criterios y los valores relativos de desempeño de las alternativas con respecto a cada criterio.
3. Agregar los pesos y valores de desempeño para prioridad alternativa.
4. Verificar la consistencia de los juicios y el resultado.

### **Paso 1**

Establecer la jerarquía de criterios y alternativas. La jerarquía es la base de AHP, esta se debe construir de criterios claros y alternativas.

### **Paso 2**

Hacer una matriz de decisión de comparación por pares. Se construye una matriz de comparación por pares para todos los criterios. En la matriz se representa un juicio cuantificado sobre un par de criterios. Se adopta una escala de 1 a 9 para realizar comparaciones no cuantitativas por pares de dos elementos, esto lo estableció Saaty en 1980. Los juicios se dan verbalmente como se indica en la Tabla 1 antes de asignar la puntuación correspondiente.

**Tabla 1. Escala de Saaty.**

<b>Escala numérica</b>	<b>Escala verbal</b>	<b>Explicación</b>
<b>1</b>	Ambos elementos son de igual importancia.	Ambos elementos contribuyen con la propiedad de igual forma.
<b>3</b>	Moderada importancia de un elemento sobre otro.	La experiencia y el juicio favorecen a un elemento por encima del otro.
<b>5</b>	Fuerte importancia de un elemento sobre otro.	Un elemento es fuertemente favorecido.
<b>7</b>	Muy fuerte importancia de un elemento sobre otro.	Un elemento es muy fuertemente dominante.
<b>9</b>	Extrema importancia de un elemento sobre otro.	Un elemento es favorecido por lo menos con un orden de magnitud de diferencia.

### Paso 3

Normalizar la matriz de decisión y calcular las prioridades de esta matriz para obtener los pesos de los criterios  $W_1$ ,  $W_2$ , y  $W_n$ . Para calcular el peso de cada criterio, la matriz de comparación debe ser normalizada. Esto se puede hacer sumando cada conjunto de valores de columna; luego, cada valor se divide por su valor sumado correspondiente. El peso relativo de los criterios  $K^{th}$  se obtiene al promediar los valores de la fila en la matriz  $K^{th}$ .

$$W_k = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{a_{kj}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}}, \quad k = (1, 2, \dots, n)$$

Donde,  $a_{ij}$  es la entrada de la fila  $i$  y la columna  $j$  en una matriz de comparación de orden  $n$  y  $w_k$  es el peso de un criterio específico  $k$  en la matriz de comparación por pares.

### Paso 4

Verificar la consistencia de los juicios para comprobar el resultado. Para derivar pesos significativos, se requiere una consistencia mínima y se debe realizar una prueba. La consistencia de las matrices de comparación es rastreada por una Proporción de Coherencia (Consistency Ratio - CR). El índice CR en AHP se usa para mantener la coherencia en la toma de decisiones de los entrevistados. CR se define de la siguiente manera:

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

$CI$  es el índice de consistencia y  $RI$  es el índice aleatorio.  $CI$  se define como:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

Donde  $\lambda_{max}$  se define como el valor propio máximo y este se calcula de la siguiente forma:

$$\lambda_{max} = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{\sum_{k=1}^n w_k a_{jk}}{w_j}}{n} \quad j=(1,2,\dots,n), k=(1,2,\dots,n)$$

Donde  $w_j$  y  $w_k$  son los pesos de los criterios obtenidos en el Paso 2.

Según Saaty (1995), CR debe ser menor o igual al 10% para ser aceptable. Un valor CR más alto indica la necesidad de un ajuste de los juicios. La clasificación de cada alternativa con cada criterio se puede obtener siguiendo un procedimiento similar. Las alternativas de decisión pueden ser prioritarias utilizando la calificación promedio ponderado.

### **1.3 Justificación**

El sureste de México tiene gran potencial para el desarrollo de plantaciones forestales comerciales y una gran superficie está disponible para el desarrollo forestal (Velázquez et al., 2013). Hasta la fecha en el sur de Oaxaca, se han logrado establecer diferentes plantaciones forestales comerciales, los cuales deben ser monitoreados con el objetivo de conocer el éxito que se ha tenido en cada uno de ellos, esto es de gran ayuda para el desarrollo de un modelo de toma de decisiones para el establecimiento de proyectos futuros en Oaxaca. Las herramientas y técnicas geomáticas conjuntamente con el uso de datos de campo (datos vectoriales del lugar de establecimiento de plantaciones) se utilizan en el monitoreo indirecto de los recursos forestales reduciendo costos y tiempo.

Además, es necesaria la obtención de áreas aptas aplicables a diferentes especies forestales maderables de interés económico tomando en cuenta sus requerimientos ecológicos, los factores topográficos y de uso de suelo. Resulta complicado asignar zonas específicas para el establecimiento de cada una de las especies por lo que en este trabajo se propone primero realizar un análisis de las plantaciones que existen en la zona para tener un panorama sobre la respuesta de las mismas y después emplear el análisis multicriterio AHP combinado con la lógica difusa, conjuntamente con los SIG para encontrar las áreas potenciales más productivas.

Esto permite tomar decisiones asertivas y exitosas para el establecimiento de futuras plantaciones incrementando la producción y productividad forestal maderable, convirtiendo áreas improductivas en productivas. La información que se genera es de utilidad para los ejidatarios e instancias ambientales que financian estos proyectos. Con el establecimiento de plantaciones se tiende a disminuir los efectos negativos del cambio climático, se generan diversos servicios ambientales y empleos en el medio rural, se reactiva la economía de las regiones y se abastece de materia prima a la industria.

## 1.4 Hipótesis

- Las plantaciones forestales comerciales establecidas con especies maderables en la zona tropical y templada han tenido éxito, y su dinámica representada a través de los índices de vegetación está relacionada con las variables ambientales.
- Existen áreas potenciales para el establecimiento de plantaciones con especies nativas maderables de interés económico en el sur del estado de Oaxaca.

## **1.5 Objetivo del trabajo**

### **1.5.1 Objetivo general**

Evaluar las plantaciones forestales comerciales establecidas en el sur de Oaxaca y determinar áreas potenciales idóneas para el establecimiento de los mismos con diversas especies nativas maderables de interés económico mediante el uso de técnicas geomáticas.

### **1.5.2 Objetivos particulares**

- Evaluar el éxito de las plantaciones forestales maderables a través de las técnicas geomáticas y analizar los factores climáticos, edafológicos y topográficos que se asocian a la dinámica de las plantaciones establecidas en municipios de la zona sur del estado de Oaxaca.
- Modelar espacialmente áreas óptimas para el establecimiento de plantaciones forestales comerciales maderables con diversas especies nativas en la región templada y tropical del sur de Oaxaca.

## CAPÍTULO II

### 2. MONITOREO DE LAS PLANTACIONES FORESTALES COMERCIALES A TRAVÉS DE LOS SENSORES REMOTOS EN OAXACA

#### 2.1 Resumen

El propósito del presente trabajo fue evaluar las plantaciones forestales de la región tropical y templada, establecidas en el periodo 2000-2014 en el sur de Oaxaca a través de métodos indirectos como es el índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), y determinar los factores ambientales que influyen en el establecimiento y desarrollo de las mismas mediante un análisis multivariante. Se utilizaron imágenes de satélite Landsat 8 OLI (2014, 2015) y Sentinel-2 (2016) para obtener el NDVI. En el análisis de las series temporales del NDVI para los tres años evaluados, se obtuvieron como resultado valores de NDVI positivos para todas las plantaciones, el cual indica presencia de vegetación en las áreas evaluadas.

Por otra parte, las variables ambientales que se consideraron para determinar el grado de influencia sobre los índices de vegetación fueron las climáticas, topográficas y edafológicas, obteniendo como resultado que cada una de esas variables influye sobre la dinámica de las plantaciones de ambas regiones evaluadas. Ante esto es de gran importancia considerar los factores ambientales y los requerimientos ecológicos de las especies antes del establecimiento de las plantaciones.

**Palabras claves:** Plantación, índices espectrales, factores ambientales, análisis multivariante.

## 2.2 Abstract

The purpose of the present work was to evaluate the forest plantations of the tropical and temperate region, established in the period 2000-2014 in the south of Oaxaca through indirect methods such as the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), and to determine the environmental factors that influence the establishment and development of them through a multivariate analysis. Landsat 8 OLI satellite images (2014, 2015) and Sentinel-2 (2016) were used to obtain the NDVI. In the analysis of the NDVI time series for the three years evaluated, positive NDVI values were obtained for all the plantations, which indicates the presence of vegetation in the areas evaluated.

On the other hand, the environmental variables that were considered to determine the degree of influence on vegetation indices were climatic, topographic and pedological, obtaining as a result that each of these variables influences the dynamics of the plantations of both regions evaluated. Given this, it is very important to consider the environmental factors and the ecological requirements of the species before the establishment of the plantations.

**Key words:** Plantation, spectral indices, environmental factors, multivariate analysis.

### 2.3 Introducción

El aprovechamiento de los bosques se ha complementado con plantaciones forestales (PF) para disminuir la presión y la reducción sobre los ecosistemas naturales. La superficie forestal aumentó un 6% en el periodo 2000-2010 en 29 países, el cual se debió al establecimiento de plantaciones (FAO, 2016); de tal manera que en el 2010 se tenía una superficie de 264 millones de ha, equivalente al 7% de la superficie forestal mundial, donde el 30% se concentró en Asia, en la cual se han empleado principalmente especies nativas. La mayoría de estos proyectos se han establecido con fines industriales y solo una mínima superficie se han establecido con fines no comerciales (FAO, 2010).

En México, los proyectos de plantaciones suelen utilizar especies que son de rápido crecimiento como *Pinus radiata* D.Don, *Pinus caribea* var. *hondurensis* Ban. y Golf., *P. taeda* L., *P. patula* Schl. et Cham, *P. elliottii* Engelman, *P. palustris* Mill, *P.oocarpa* Shiede, *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, *E. urophylla* S.T.Blake y *E. globulus* Labill en un 70%, mientras que *Tectona grandis* L. f. cubre el 15%, otras latifoliadas como *Gmelina arbórea* Roxb, *A. mangium* Wild y *Alibiza falcata* (L.) Fosberg el 12% y otras coníferas el 3% (Musálem, 2006; Velázquez et al., 2013).

Las PF que se han establecido en México son diversas. El primer intento se realizó en el año 1932 por la compañía cerillera “La Imperial”, quien realizó plantaciones de álamos en el municipio de Chalco, estado de México (Velázquez et al., 2013), posteriormente en la década de 1950 la empresa “Fibracel” plantó *Eucalyptus* spp., *Gmelina* spp. y otras latifoliadas, en Tamuin, San Luis Potosí, de tal manera que para 1969 se habían plantado 5 000 ha (Mejía et al., 2015; Velázquez et al., 2013) y para el 2013 fue de 224,350 ha, donde las especies maderables cubrieron un 66.8%, mientras que las especies no maderables un 33.2% (Sosa et al., 2015).

De 1974 a 1983 se desarrolló un proyecto relevante en Oaxaca, donde se plantaron alrededor de 10000 ha de *Pinus caribaea* var. *Hondurensis* Ban. y Golf. y *Pinus oocarpa* Shiede en la cuenca baja del Rio Papaloapan (Escárpita-Herrera, 1978), y en la actualidad han ganado terreno en áreas donde anteriormente se utilizaba para la agricultura, y que posteriormente fueron abandonados por falta de fertilidad de los mismos, sin embargo con ello se pueden obtener beneficios económicos, sociales y ambientales.

Conocer la situación actual de las masas forestales requiere de una gestión y monitoreo de dichos recursos; para esto se requiere de técnicas que faciliten el trabajo como es el empleo de los sensores remotos y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) (Castillo-Ramiro, Gama & Zequeira-Lairos, 2015). Los SIG representan la realidad de manera gráfica a través de la construcción de modelos que facilitan de cierta forma la solución de un problema (Buzai, 2013; Olaya, 2014) y permiten integrar una serie de datos para la evaluación de los recursos forestales (García-Nieto, García-D., Moreno-Sánchez, López-Blanco & Villers-Ruíz, 2001; Olivas-Gallegos, Valdez-Lazalde, Aldrete, González-Guillén & Vera-Castillo, 2007).

El uso de la percepción remota en el ámbito forestal ha incrementado debido a la facilidad que ofrece para llevar a cabo diferentes acciones, y así reducir costos y tiempo mediante la captura de información territorial a partir de la radiación electromagnética captada por sensores (Duarte et al., 2016); y a través del mismo se denota el estado de los recursos agrícolas y forestales. Por lo tanto, con estos datos es posible obtener la superficie cultivada, deforestada, suelos compactados y rocosos, áreas degradadas por incendios, densidad de la vegetación, entre otras (Córdova, Delgado & Ramos, 2014) mediante índices espectrales como el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), el cual es un indicador del vigor de la vegetación (Duarte et al., 2016). El principal inconveniente del NDVI radica en su tendencia a saturarse en cubiertas vegetales moderadas o densas (Martín, Corbera, Marchan & Gonzáles, 2011).

Estas herramientas se han desarrollado para realizar estudios en regiones de grandes extensiones, con terrenos inaccesibles, en áreas con baja disponibilidad de información básica o de recursos económicos, motivo por el que la percepción remota es utilizada en el ámbito forestal para estimar un amplio número de variables biofísicas, como volumen, biomasa de las superficies boscosas, índice de área foliar (Leaf Area Index - LAI), humedad y temperatura, entre otras variables (Eckert, Kellenberger & Lencinas, 2005; Lencinas y Mohr-Bell, 2007; Pachana, 2016)..

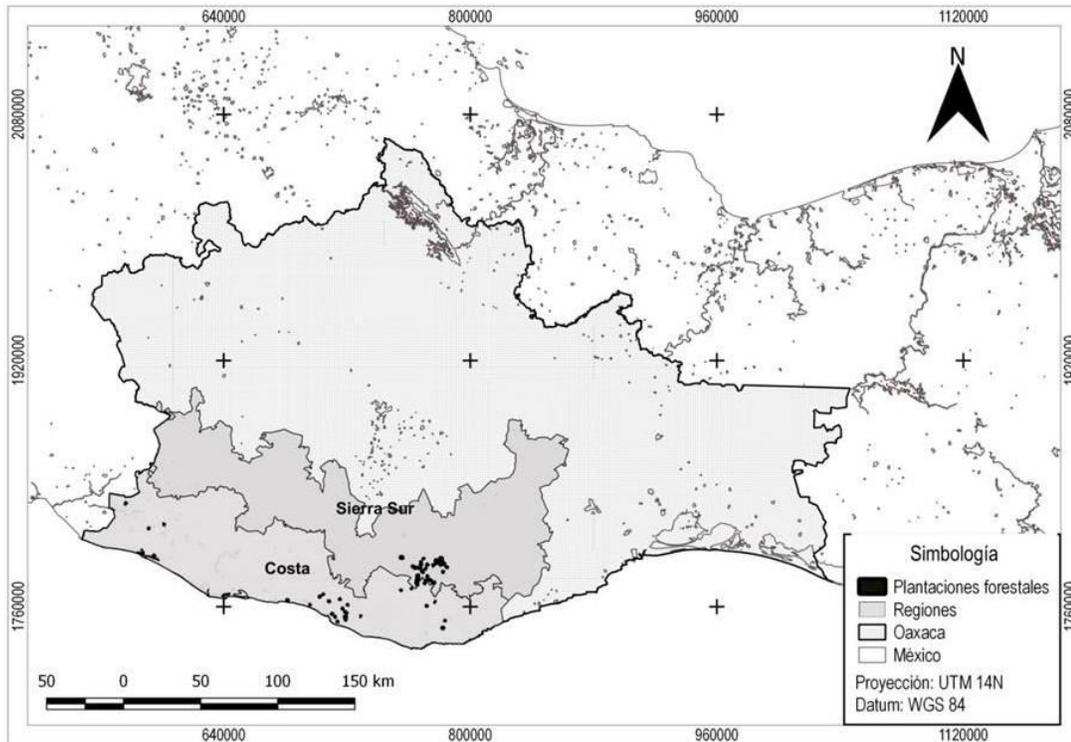
El objetivo del presente trabajo fue monitorear las plantaciones forestales comerciales de la región tropical y templada establecidas en el periodo 2000-2014 durante tres periodos diferentes (2014, 2015 y 2016) a través de la percepción remota y los SIG, y analizar los factores ambientales que influyen en el desarrollo de los mismos mediante el análisis de la relación existente entre los índices de vegetación y las variables climáticas, edafológicas y topográficas.

## **2.4 Materiales y métodos**

### **2.4.1 Localización y descripción del área**

El estudio se desarrolló en el estado de Oaxaca, México. La extensión del estado es de 93757 km<sup>2</sup>, que representan 4.78 % del territorio nacional; el punto central del estado es 15° 39' y 18° 39' N, y los 93° 52' y 98° 32' W; limita al norte con Veracruz y Puebla, al sur con el océano Pacífico, al este con Chiapas y al oeste con Guerrero, está integrado por 570 municipios agrupados en ocho regiones (INEGI, 2016). El estudio se desarrolló en una superficie que involucra parte de la región sierra sur (RSS) y costa (RC).

Las plantaciones evaluadas suman una superficie de 1484 hectáreas, y se encuentran ubicados en los municipios que se muestran en la Figura 1.



**Figura 1. Ubicación del área de estudio.**

El área evaluada en la región costa (RC) corresponde a selva y la región sierra (RSS) a bosque templado, ambos incluyen plantaciones forestales que se han establecido en áreas agrícolas abandonadas y/o degradadas.

El clima de la RC es cálido subhúmedo y semicálido subhúmedo con una temperatura máxima de 32 a 36 °C, una media de 24 a 28 °C, la precipitación media anual varía de 800 a 1500 mm y sus unidades de suelo son regosoles, umbrisoles, leptosoles, luvisoles y phaeozem. En la RSS el clima es templado subhúmedo y semifrío subhúmedo con una temperatura media de 12 a 18°C, y una precipitación de 1000 a 1500 mm; los tipos de suelos para el área son cambisol, leptosol, luvisol y umbrisol.

## **2.4.2 Registros de plantaciones forestales comerciales**

Se obtuvieron registros y datos vectoriales de las plantaciones establecidas en el estado de Oaxaca durante el periodo 2000 a 2014 financiadas por la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). De esta base de datos se hizo una depuración de la información para enfocarse a los predios con una superficie mayor o igual a 5 hectáreas; se consideró este criterio con el fin de facilitar la evaluación indirecta de los mismos mediante el uso de imágenes de satélite y los sistemas de información geográfica.

Las plantaciones forestales evaluadas en la región tropical se realizaron con las siguientes especies: *Cedrela odorata* L., *Swietenia humilis* Zucc., *Tabebuia rosea* (Bertol.) DC, *Swietenia macrophylla* King; y en la región templada con las siguientes: *Pinus pseudostrobus* Lindl., *P. greggii* Engelm. ex Parl, *P. patula* Schl. et Cham, *P. ayacahuite* Ehrenb, *P. douglasiana* Martínez, *P. maximinoi* H.E.Moore y *P. leiophylla* Schl. & Cham.

## **2.4.3 Información cartográfica**

Se obtuvo información temática correspondiente al clima, edafología y topografía de la página de CONABIO, INEGI y del Inventario Nacional Forestal y de Suelos con la finalidad de analizar y registrar las condiciones ambientales de la zona donde se encuentran ubicada cada una de las plantaciones. Con los datos de las variables ambientales se elaboró una matriz con la que posteriormente se llevó a cabo un análisis multivariante.

## **2.4.4 Obtención y procesamiento de las imágenes de satélite**

Se adquirieron escenas de imágenes de satélite del año 2014, 2015 y 2016, donde las correspondientes al 2014 y 2015 fueron del satélite Landsat 8 OLI y las del 2016 fueron de Sentinel-2. Todas las imágenes se obtuvieron de manera

gratuita en los siguientes enlaces: [http:// earthexplorer.usgs.gov/\(Landsat 8\)](http://earthexplorer.usgs.gov/(Landsat%208)) y <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home> (Sentinel-2).

Las escenas de imágenes satelitales Landsat 8 que cubrieron el área de interés fueron tomadas en el mes de noviembre y diciembre del año 2014 y 2015, cuya resolución de las bandas utilizadas son de 30 metros. En la página de Sentinels Scientific Data Hub del proyecto Copernicus se obtuvieron escenas de imágenes Sentinel-2 (S-2) del año 2016 correspondiente a los meses de noviembre y diciembre cuya resolución de las bandas empleadas son de 10 metros. En el procesamiento de las imágenes se llevaron a cabo correcciones como: la radiométrica, la geométrica y la atmosférica.

#### **2.4.5 Cálculo de índices espectrales**

El índice espectral que se empleo para el monitoreo de las plantación fue el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) para los años 2014, 2015 y 2016, debido a que el NDVI ayuda a describir la dinámica de la vegetación, es un indicador de la cantidad, calidad, desarrollo y vigor de la vegetación (Escribano-Rodríguez, Díaz-Ambrona & Tarquis-Alfonso, 2015; Muñoz-Marcillo, Cuasquer-Fuel, Moncayo-Carreño & Delgado-Campuzano, 2016; Torre et al., 2014), el cual se calculó empleando la siguiente expresión:

$$NDVI = \frac{IRC - R}{IRC + R}$$

*Donde:*

*IRC= infrarrojo cercano y R= rojo.*

Esta expresión se adaptó para las imágenes de Landsat 8 OLI quedando de la siguiente manera:

$$NDVI = \frac{\text{Banda 5} - \text{Banda 4}}{\text{Banda 5} + \text{Banda 4}}$$

Y para Sentinel-2 quedó como:

$$\text{NDVI} = \frac{\text{Banda 8} - \text{Banda 4}}{\text{Banda 8} + \text{Banda 4}}$$

#### 2.4.6 Análisis estadístico y clasificación de los índices de vegetación

En la evaluación de las series temporales del NDVI, se hizo la extracción de la superficie correspondiente a las plantaciones, después a cada porción de imagen se le determinaron valores de la estadística descriptiva (media, desviación estándar, el valor mínimo y máximo de los índices) para cada periodo evaluado mediante el uso de QGIS.

Después del análisis se clasificaron los valores del NDVI tomando como referencia la categorización propuestos por Merg et al. (2011) y López-Pérez, Martínez-Menes y Fernández-Reynoso (2015); mencionan que los valores de 0.2 a 0.4 corresponden a área con vegetación mediana y valores mayores a 0.4 corresponden a vegetación alta (Tabla 2). Por otra parte, Meneses-Tovar (2012) menciona que los valores comprendidos entre 0 y 0.4 determinan vegetación baja o rala, valores comprendidos entre 0.5 a 0.8 corresponden a vegetación en desarrollo y valores elevados como 0.8 a 1 determinan vegetación sana, vigorosa y densa.

**Tabla 2. Clasificación de los valores del NDVI (Merg et al., 2011).**

<b>Clasificación</b>	<b>Valor</b>
Nubes y agua (NA)	<0.01
Suelo sin vegetación (SV)	0.01-0.1
Vegetación ligera (VL)	0.1-0.2
Vegetación mediana (VM)	0.2-0.4
Vegetación alta (VA)	>0.4

## 2.4.7 Influencia de los factores ambientales en las plantaciones forestales

Con el propósito de analizar las variables ambientales que podrían estar asociadas con el NDVI y otros índices espectrales (EVI, NDWI, NDVI2), se realizó un análisis multivariado de correspondencia canónica, determinando así las variables influyentes en el incremento o decremento del valor de los índices. El Índice de Vegetación Mejorado (EVI) es un NDVI mejorado con un factor de corrección del suelo (Sakowska, Juszczak & Gianelle, 2016), se calculó de la siguiente manera (ajustado para S-2):

$$EVI = \frac{2.5 * (B8a - B4)}{(1 + B8a + 6 * B4 - 7.5 * B2)}$$

*Donde:*

*B8a= Banda Infrarrojo cercano; B4= B. Rojo; B2= B. Azul; 2.5, 1, 6 y 7.5 son constantes.*

También se obtuvo el Índice de Humedad de Diferencia Normalizada (NDWI), éste índice indica la cantidad de humedad disponible en la vegetación (Sakowska, Juszczak & Gianelle, 2016), y se calculó mediante la siguiente ecuación (ajustado para S-2):

$$NDWI = \frac{B8a - B11}{B8a + B11}$$

*Donde:*

*B8a= Banda infrarrojo cercano y B11= Infrarrojo lejano.*

Y el último índice que se obtuvo fue otro NDVI mediante el empleo de la banda 8a (denominado en el resto del documento como NDVI8a), cuya resolución espectral es de 865. La expresión empleada fue la siguiente:

$$NDVI_{8a} = \frac{B_{8a} - B_4}{B_{8a} + B_4}$$

*Donde:*

*B<sub>8a</sub>*= Banda infrarrojo cercano y *B<sub>4</sub>*= Banda rojo.

Se determinó el grado de asociación entre los índices espectrales para definir cuáles podrían ser empleados en el análisis multivariado, los que resultaron de una correlación perfecta fueron descartados para evitar problemas por los altos niveles de colinealidad entre variables explicativas que pueden sesgar los parámetros estimados. El grado de dependencia existente entre la serie temporal de los índices de vegetación con las variables de precipitación media anual, temperatura media anual, altitud, pendiente, pH y profundidad del suelo se obtuvo con el software estadístico R Studio.

## **2.5 Resultados y discusión**

### **2.5.1 Respuesta de las plantaciones hacia el NDVI**

En la evaluación indirecta que se llevó a cabo mediante el empleo del NDVI para recopilar información sobre la dinámica de las plantaciones, se consideraron 28 plantaciones forestales ubicadas en la zona tropical y 50 plantaciones en la zona templada. Estos dos grupos de plantas se analizaron por separado debido a que las coníferas y las latifoliadas presentan respuestas espectrales diferentes y por ende valores de NDVI diferentes.

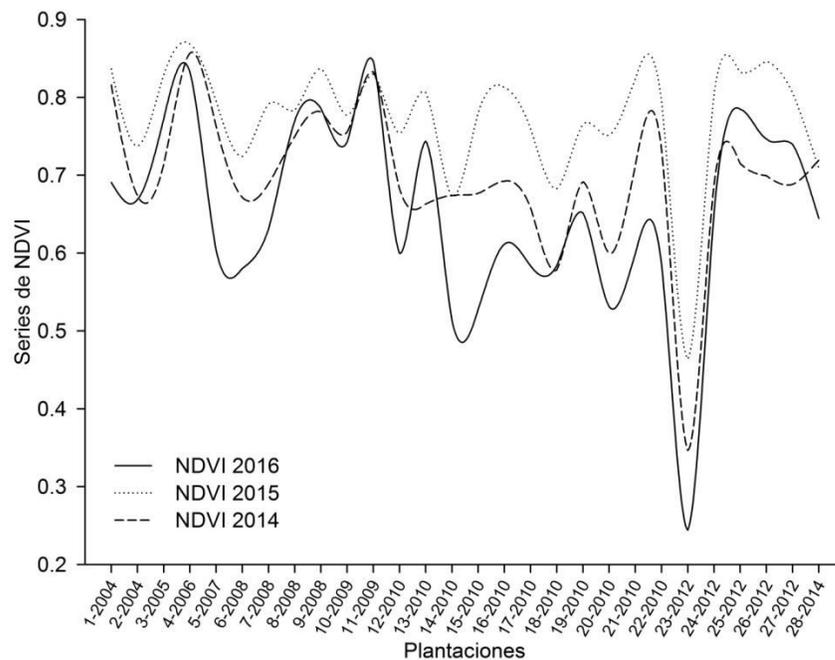
#### **Plantaciones forestales de la región tropical**

En la primera evaluación (año 2014), se obtuvieron valores de NDVI por arriba de 0.5, esto indica que los objetos evaluados corresponden a una vegetación media a alta y vigorosa de acuerdo a la clasificación realizada por Merg et al. (2011). Para la segunda evaluación correspondiente al año 2015, los resultados fueron similares a la primera evaluación con un pequeño incremento, donde la

mayoría de los predios presentaron valores de NDVI mayores a 0.5, con variaciones entre las mismas.

En la evaluación del 2016, los resultados presentaron una tendencia similar a los años anteriores, con valores de NDVI por arriba de 0.4; sin embargo, los valores del índice son menores con respecto a las dos evaluaciones anteriores, el cual se debe a la resolución diferente que presentan las imágenes, ya que mientras mejor resolución se tenga mayor será la claridad con la que se representan los objetos en las imágenes. Por el contrario, la plantación núm. 23 establecida en el 2012 en las tres series de NDVI presentan un valor muy bajo, esto podría indicar que en ese predio no hay un resultado favorable con respecto al éxito de su establecimiento.

En la Figura 2 se muestran los resultados del NDVI de tres periodos evaluados de las plantaciones ubicados en la región tropical, donde cada uno está enumerado con su respectivo año de establecimiento.

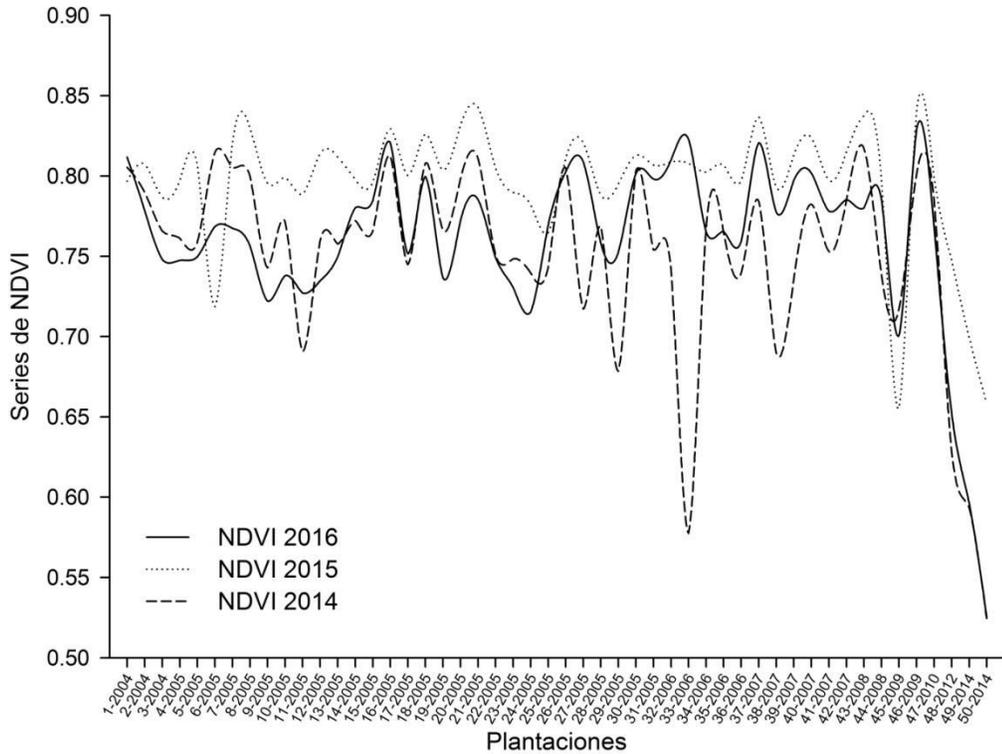


**Figura 2. Series del NDVI de las plantaciones de la región tropical.**

Los resultados obtenidos en este análisis son similares a los de Alatorre, Beguería y Vicente-Serrano (2010), en la cual mencionan que la tendencia del NDVI en incremento se presenta en las áreas con buena cobertura vegetal, y la tendencia a la baja del NDVI corresponde a zonas desprovistas de vegetación; además todos los valores de NDVI presentan una tendencia positiva similar a lo que presenta Vicente-Serrano, Lasanta y Romo (2004) para bosques y vegetación bien desarrollada.

### **Plantaciones forestales de la región templada**

En la evaluación de las plantaciones de la zona templada se obtuvo valores de NDVI mayores a 0.5 para los tres años considerados en el análisis, además presentan una tendencia similar con pequeñas variaciones entre las mismas (Figura 3). Las plantaciones establecidas en los últimos años presentan un decaimiento en los valores del índice porque son las que tienen un crecimiento y desarrollo menor a comparación de los demás. Todos los valores de NDVI presentan una tendencia positiva similar a lo que presenta Vicente-Serrano, Lasanta y Romo (2004) para bosques y vegetación bien desarrollada.



**Figura 3. NDVI de las plantaciones de la región templada.**

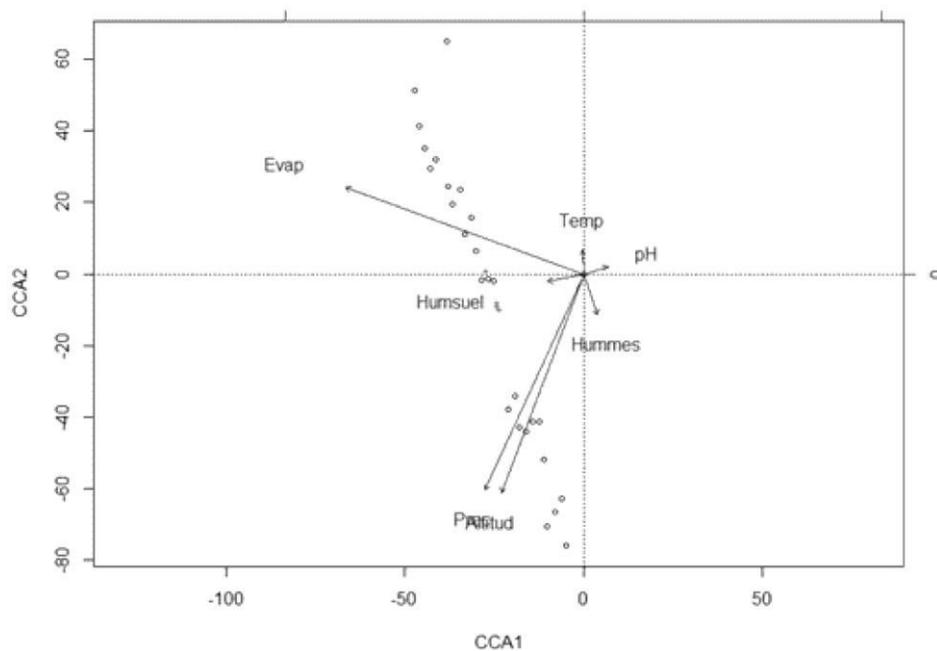
En ambos grupos de vegetación analizados los valores del NDVI fueron altos, por lo que se considera que esto corresponde a una vegetación en desarrollo con una buena actividad fotosintética (cuando el NDVI >0.3) (Lillesand, Kiefer & Chipman, 2008). Palestina, Equihua y Pérez-Maqueo (2015) indican que los valores entre 0.2-0.3 representan vegetación baja, arbustos o pastizales y valores altos entre 0.6-0.8 indican bosques templados o tropicales.

El NDVI como predictor de la biomasa de la vegetación ha sido utilizado en diferentes investigaciones debido a que éste índice está relacionado con el crecimiento de las plantas e indica las características y la dinámica de la vegetación (Zhao, Gao, Wang, Liu & Li, 2015); no es el único índice de vegetación que existe para representar el verdor y caracterizar diferentes aspectos estructurales de los bosques pero es uno de los más populares, y se basa en la reflectividad de longitudes de onda pertenecientes a la parte óptica del espectro electromagnético (Anaya-Acevedo & Valencia-Hernández, 2013).

## 2.5.2 Análisis multivariante. Índices de vegetación vs variables ambientales

Los índices que se tomaron en cuenta para llevar a cabo el análisis de correspondencia canónica fueron el NDVI, EVI y NDWI, descartando el NDVI8a por el alto grado de asociación que presentó con el NDVI; y las variables ambientales consideradas fueron: precipitación, altitud, humedad, evapotranspiración, pH y temperatura.

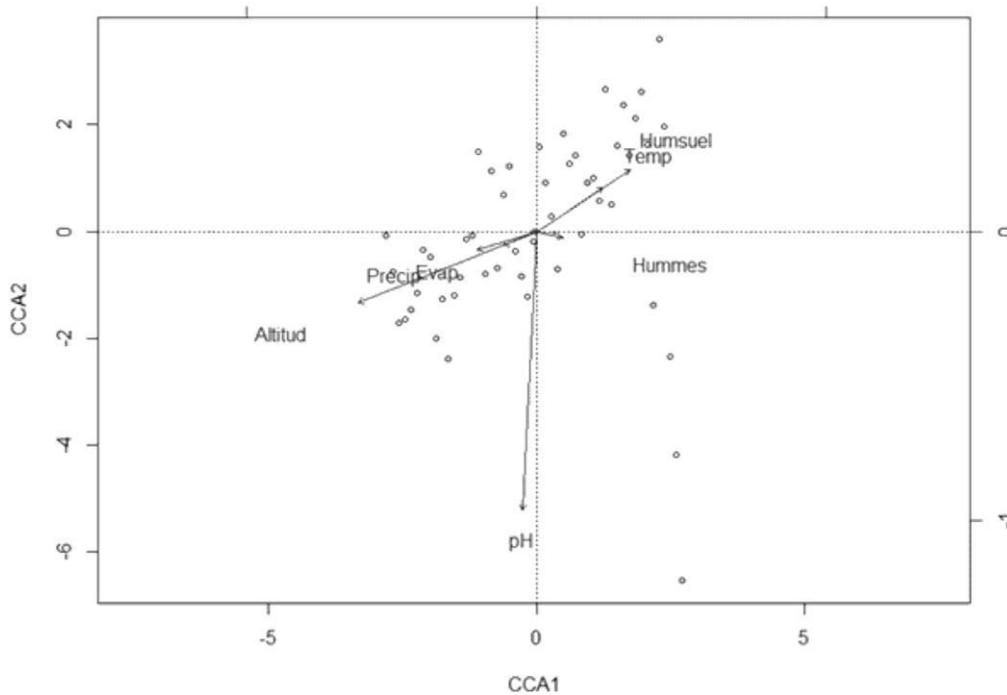
Para las plantaciones de la región tropical, la altitud, la precipitación y la evapotranspiración son los factores más relevantes que influyen sobre los índices de vegetación (Figura 4). Con este análisis realizado se reafirma que es indispensable considerar estas variables al momento de establecer plantaciones forestales.



**Figura 4. Análisis multivariado: índices de vegetación vs variables ambientales (plantaciones de la región tropical).**

Con respecto a las plantaciones en la zona templada se obtuvo que la precipitación, la altitud y la humedad son los factores que más están asociadas al desarrollo y crecimiento de la vegetación (Figura 5), indicando que las variables

ambientales tienen una gran importancia en la variación espacial y temporal del NDVI de la vegetación (Guo, Zhou, Wang & Tao, 2014).



**Figura 5. Análisis multivariado: índices de vegetación vs variables ambientales (plantaciones de la región templada).**

Las variables ambientales tienen cierta influencia ya sea positiva o negativa sobre la vegetación, el cual se debe de entender con claridad los que favorecen o limitan el desarrollo de las especies forestales para poder planificar mejor las futuras plantaciones. El uso de esta información ayudará a evitar los fracasos frecuentes causados por descuidos en la etapa de selección del sitio, por lo tanto, conocer las características del sitio es muy importante porque éste es un indicador del potencial productivo del terreno, y está relacionado con los factores bióticos y abióticos; pero no es lo único que se debe de considerar, también se deben de considerar las características de las plantas (Jofré et al., 2013; Schlatter y Gerding, 2014).

## 2.6 Conclusiones

La evaluación indirecta de las plantaciones mediante el análisis de series temporales de NDVI, indicó que la vegetación existente en los diferentes predios evaluados es favorable por los valores obtenidos. Este índice es muy utilizado para la evaluación de la vegetación, debido a que es un buen indicador de la calidad, cantidad y desarrollo de las masas forestales en los diferentes ecosistemas.

Los resultados del índice permiten evaluar si una superficie corresponde a suelo desnudo o a masas forestales gracias a las herramientas de la geomática, trayendo consigo la reducción de costos y tiempo. El índice de vegetación obtenido de las imágenes de satélite Landsat-8 OLI y Sentinel-2 para el área de estudio, muestran que los valores de NDVI de Landsat-8 generalmente están por encima de los de Sentinel-2, esto puede deberse a la resolución de los productos.

Por otra parte, a partir del análisis multivariado de correspondencia canónica tomando en cuenta los índices de vegetación y los factores ambientales se obtuvieron las variables que son de gran importancia a considerar al momento de ejecutar proyectos relacionados con las plantaciones en zonas de clima tropical y templado, coincidiendo con lo que mencionan los expertos del tema en el crecimiento y productividad de las masas forestales.

## CAPÍTULO III

### 3. ÁREAS POTENCIALES PARA EL ESTABLECIMIENTO DE PLANTACIONES FORESTALES COMERCIALES EN OAXACA

#### 3.1 Resumen

La identificación de sitios potenciales para plantaciones es una tarea para la gestión eficiente de los recursos forestales en distintos lugares. En este documento se describe un modelo basado en SIG, lógica difusa y Proceso Analítico Jerárquico (AHP) para encontrar áreas potenciales productivas para el establecimiento de plantaciones con especies nativas. Con base en los datos disponibles y una revisión de literatura se seleccionaron los factores climáticos, edafológicos, topográficos y otros factores secundarios limitantes, estos fueron: precipitación media anual, temperatura mínima, máxima y media anual; profundidad, textura y pH del suelo; altitud y pendiente; uso de suelo y vegetación, vías de comunicaciones y transportes, ríos y cuerpos de agua. Se utilizó la lógica difusa para estandarizar los factores considerando los requerimientos que demanda cada una de las especies, y con el AHP se realizaron las ponderaciones. La superficie óptima para este objetivo se obtuvo a partir de una agregación lineal de los productos de los criterios estandarizados difusos y los pesos derivados de AHP. Los niveles de aptitud obtenidos fueron tres: alto, medio y bajo. Se encontró que las especies que mostraron una distribución óptima más amplia fueron *Cedrela odorata* L., *Swietenia humilis* Zucc. y *Pinus patula* Schl. et Cham.

**Palabras claves:** Plantación, lógica difusa, AHP, potencial.

### 3.2 Abstract

The identification of potential sites for plantations is a task for the efficient management of forest resources in different places. This paper describes a model based on GIS, fuzzy logic and Hierarchical Analytical Process (AHP) to find potential productive areas for the establishment of plantations with native species. Based on the available data and a literature review, the climatic, soil, topographic and other secondary limiting factors were selected, these were: annual average precipitation, minimum, maximum and annual average temperature; depth, texture and pH of the soil; altitude and slope; use of soil and vegetation, communication and transportation routes, rivers and bodies of water. Diffuse logic was used to standardize the factors considering the requirements demanded by each of the species, and with the AHP the weights were made. The optimal surface for this objective was obtained from a linear aggregation of the products of the standardized fuzzy criteria and the weights derived from AHP. The fitness levels obtained were three: high, medium and low. It was found that the species that showed the widest optimal distribution were *Cedrela odorata* L., *Swietenia humilis* Zucc. and *Pinus patula* Schl. et Cham.

**Keywords:** Plantation, fuzzy logic, AHP, potential.

### 3.3 Introducción

La creciente demanda de la madera en rollo a nivel nacional y global, hace indispensable un desarrollo sostenible de plantaciones forestales para abastecer la demanda de este recurso. Es probable que se afronte a una serie de retos económicos, ambientales y sociales, y requiera de medidas enérgicas por parte de los principales actores, como son los gobiernos o los inversores estratégicos y financieros (Barua, Lehtonen & Pahkasalo, 2014). Para lograr un incremento en la productividad de la madera es necesario contar con terrenos adecuados para dicho objetivo, para ello es necesario llevar a cabo un análisis profundo sobre el potencial del terreno a través del uso de diversas herramientas.

El mapeo de áreas óptimas para el crecimiento y desarrollo de las especies forestales empleadas en plantaciones, se considera una herramienta eficaz para la toma de decisiones y la obtención de zonas potenciales para el mismo. Además, aborda la probabilidad de que un terreno tenga alto valor productivo para las especies forestales que sean de interés.

La obtención de áreas adecuadas para las plantaciones requiere de un enfoque multicriterio y altos niveles de exactitud y fiabilidad en los mapas resultantes, el cual está relacionado al método de toma de decisiones, así como los datos utilizados para el desarrollo del modelo (Feizizadeh, Roodposhti, Jankowski & Blaschke, 2014), y con base a esto lograr diseñar y desarrollar planes de establecimiento de plantaciones.

El Proceso Jerárquico Analítico (AHP por sus siglas en inglés) es una técnica de toma de decisiones que ha sido ampliamente utilizado por ser una herramienta de análisis multicriterio eficiente, sin embargo los investigadores han modificado esta técnica con el fin de controlar la incertidumbre, formulando la combinación de la lógica difusa y el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) dentro de un Sistema de Información Geográfica (SIG) y esto ha facilitado la toma de decisiones para

resolver problemas complejos como los que se presentan en el sector ambiental (Caha y Burian, 2018; Pérez-Rodríguez, Vargas-Larreta, Aguirre-Calderón Corral-Rivas & Rojo-Alboreca, 2013; Saaty, 1980; Saaty, 2013).

Se basa en una metodología para simplificar una situación compleja y no estructurada en sus componentes y partes más pequeñas, de manera jerárquica, lo que permite asignar valores numéricos a juicios subjetivos, considerando la importancia relativa de cada variable o factor (Golubov et al., 2014).

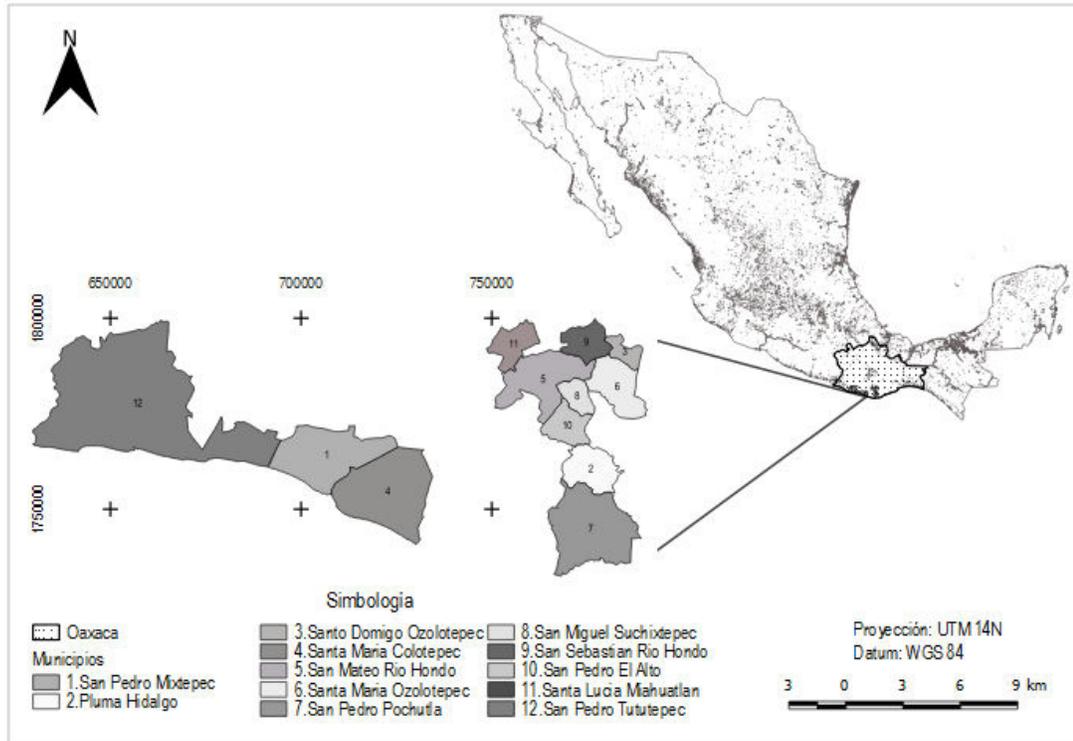
El objetivo de este trabajo fue determinar áreas idóneas para el establecimiento de plantaciones forestales comerciales con diversas especies nativas de interés económico en la región sur del estado de Oaxaca, México. Por otra parte, la hipótesis que se planteó fue que existen áreas de adecuadas para el establecimiento de plantaciones en el sur de Oaxaca, y este se puede determinar a través de un modelado espacial multicriterio.

### **3.4 Materiales y métodos**

#### **3.4.1 Localización y descripción del área de estudio**

El presente estudio se realizó en el sur de Oaxaca, dicho estado está integrado por 570 municipios, agrupados en ocho regiones.

En la obtención de áreas potenciales productivas para plantaciones de *Cedrela odorata* L., *Swietenia humilis* Zucc., *Tabebuia rosea* (Bertol.) DC, *Pinus pseudostrobus* Lindl., *P. ayacahuite* Ehrenb., *P. patula* Schl. et Cham, *P. douglasiana* Martínez, *P. maximinoi* H.E.Moore y *P. leiophylla* Schl. & Cham. se consideraron los municipios que se mencionan en la Figura 6; se tomaron en cuenta estos municipios debido a que han participado en este tipo de proyectos.



**Figura 6. Ubicación del área de estudio correspondiente a PFC.**

La vegetación de los municipios que conforman el área de estudio corresponde a selva y bosque templado, además incluyen pequeñas áreas destinadas a la agricultura, áreas deforestadas, áreas de ganadería y plantaciones forestales que se han establecido en áreas agrícolas abandonadas y/o degradadas.

El clima de los municipios que abarcan la región costa es cálido subhúmedo y semicálido subhúmedo con una temperatura máxima de 32 a 36 °C, una media de 24 a 28 °C y una mínima de 6 a 14 °C; la precipitación media anual varía de 800 a 1500 mm y sus unidades de suelo son regosoles, umbrisoles, leptosoles, luvisoles y phaeozem, en general estos suelos son de textura media (suelos con equilibrio de limo, arcilla y arena) y gruesa (suelo con mucha arena). El área de interés que abarca la región sierra sur, presenta un clima templado subhúmedo y semifrío subhúmedo con una temperatura media de 12 a 18°C, y una precipitación de 1000 a 1500 mm; los tipos de suelos para el área son cambisol, leptosol, luvisol y umbrisol, los cuales son de textura media y fina. La profundidad

del suelo en ambas regiones es desde poco hasta muy profundos (Fernández-Eguiarte, Romero-Centeno y Zavala-Hidalgo, 2012; INEGI, 2008; INEGI, 2015; INEGI, 2015a; INEGI, 2016).

La zona de estudio comprende montañas, llanuras y lomeríos con profundidades, barrancos y laderas que forman parte de la prolongación de la Sierra Madre del Sur. Las más pronunciadas se localizan en la porción central del Estado (INEGI, 2016).

### **3.4.2 Selección de factores ambientales**

La obtención de áreas óptimas para el establecimiento de plantaciones requirió considerar variables ambientales que están relacionadas con el crecimiento y desarrollo adecuado de las diversas especies que se emplean para este fin.

En este caso, se llevó a cabo una amplia revisión bibliográfica para definir los factores ambientales de mayor relevancia que consideran los expertos del tema. Se encontró que los criterios más importantes son: clima, suelo y topografía, de las cuales se derivan los siguientes subcriterios: precipitación, temperatura mínima, máxima y media anual, profundidad del suelo, textura del suelo, el pH, la altitud y la pendiente (Aguirre-Salado, Valdéz-Lazalde, Sánchez-Díaz, Miranda-Aragón & Aguirre-Salado, 2015; Bustillos-Herrera, Valdez-Lazalde, Aldrete & González-Guillén, 2007; Ceballos-Silva & López-Blanco, 2010; Delgado-Caballero, Valdez-Lazalde, Fierros-González, de los Santos-Posada & Gómez-Guerrero, 2010; Muñoz-Flores, Sáenz-Reyes, García-Sánchez, Hernández-Máximo & Anguiano-Contreras, 2011; Muñoz-Flores, Sáenz-Reyes, García-Magaña, Coria-Ávalos & Muñoz-Vega, 2015; Olivas et al., 2007; Silva et al., 2016).

Las variables secundarias que se consideraron fueron: uso de suelo y vegetación, los cuerpos de agua, los ríos y arroyos, las carreteras y caminos;

estos fueron las restricciones que se incluyeron en el desarrollo de los modelos de áreas óptimas.

### **3.4.3 Obtención y procesamiento de datos cartográficos**

Se utilizó información temática sobre el clima, edafología y topografía correspondientes a cada uno de los criterios y subcriterios. Los datos de precipitación media anual, temperatura media anual, temperatura mínima y temperatura máxima se obtuvieron de INEGI a escala 1:250000; la profundidad, el pH y la textura del suelo se obtuvieron del Inventario Nacional Forestal y de Suelos 2009-2014, dicha información proviene de muestras de suelo de la capa superficial (0 a 20 cm) y que además se complementó con la información de INEGI a escala 1:250000; de INEGI también se obtuvo el modelo digital de elevación de alta resolución LIDAR con resolución de 5 m generando con ello información de altitud y pendiente (INEGI, 2005; INEGI, 2008). Las capas vectoriales de las restricciones antes mencionadas se obtuvieron de INEGI a escala 1:50000, y el uso de suelo y vegetación serie VI a escala 1:250000 (INEGI, 2015).

Para los caminos se elaboró un buffer o zona de amortiguamiento de 40 m, para los cuerpos de agua y ríos perennes se consideró un área de amortiguamiento de 80 m, y para los ríos intermitentes una zona de protección de 40 m. A través del uso de suelo y vegetación se definió que solo se podrá establecer plantaciones en áreas que corresponden a agricultura de temporal con cultivos anuales, agricultura de temporal con cultivos semipermanentes, pastizal cultivado e inducido y áreas degradadas.

### **3.4.4 Requerimientos ecológicos de las especies**

Se realizó una revisión de los requerimientos ecológicos de las especies enlistadas anteriormente, haciendo énfasis en los factores ambientales de gran

importancia de acuerdo a los expertos del tema. Se recopiló información existente de diferentes autores para cada una de las especies y con base a esto se definió el intervalo de las condiciones ambientales idóneas en la que se desarrollan las especies que se consideraron en este trabajo. En seguida se describe de manera breve los requerimientos ecológicos de las especies forestales.

### ***Tabebuia rosea* (Bertol.) DC.**

Es un árbol caducifolio de 15 a 25 m (hasta 30 m) de altura, con un diámetro a la altura del pecho de hasta 1 m. Se encuentra en la vertiente del Golfo desde el sur de Tamaulipas y el norte de Puebla y Veracruz hasta el norte de Chiapas y sur de Campeche; en la vertiente del Pacífico desde Nayarit hasta Chiapas. Crece desde el nivel del mar hasta los 1450 m. Se presentan indiferentemente en suelos de origen calizo, ígneo o aluvial, calcáreo, arcilloso y cenagoso, de tipo vertisol pélico, vertisol gleyco y planosol; con textura arenosa, franca y franca arcillosa cuyo pH puede ser ácido, neutro y alcalino. Se desarrollan en suelos profundos, moderadamente profundos con buen drenaje, aunque tolera la inundación. La temperatura media donde se presenta es de 19 a 27 °C, una mínima de 16.1 °C (a veces de 17 a 22 °C) y una máxima de 23 a 30 °C. La precipitación media que demanda esta especie es de 1500 a 2500 mm, con una mínima de 1614 mm y una máxima de 2007 mm (CONABIO-CONAFOR, 2003a; Herrera, 2015; Rodríguez et al., 2009; Salazar, 1997).

### ***Cedrela odorata* L.**

Esta especie se distribuye desde el norte de México hasta el norte de Argentina, incluidas las islas del Caribe. Se le encuentra desde el nivel del mar hasta a los 1900 m (media de 596.7 m), se cita que su óptimo desarrollo lo alcanza en altitudes de hasta 1500 m; con temperatura media anual de 22 a 32 °C, una mínima de 11 a 22 °C, media de 23 a 26 °C y máxima de 20 a 32 °C; su óptimo desarrollo lo alcanza en temperaturas medias de 25 °C. La precipitación oscila

entre 800 y 3000 mm por año (o incluso hasta 3738 pero solamente en los sitios muy bien drenados, sin embargo, alcanza un mejor desarrollo entre los 1200 a 2500 mm). Es una especie exigente en suelos, requiere suelos profundos, aireados, bien drenados, fértiles, pH entre 5 y 7 (ácido, alcalino y neutral), con buena disponibilidad de elementos mayores, variando de franco arcillosos a franco-arenosos. Tolera sitios húmedos, y soporta suelos neutros y calcáreos, más o menos profundo (Citrón, 1990; CNIC, 2005; CONABIO-CONAFOR, 2003b; Farfán, 2012; Galán et al., 2008; Muñoz et al., 2012; Rodríguez et al., 2009).

### ***Swietenia humilis* Zucc.**

Es una especie del bosque seco y húmedo tropical, alcanza de 10-25 m de altura y hasta 1 m de diámetro, con fuste limpio hasta 3.5 m de altura. Se desarrolla a una altitud de 0 a 1000 m. Crece mejor en suelos profundos de más de 50 centímetros, con textura fina, media o gruesa, prefiere suelos con pH ligeramente ácidos y bien drenados, preferiblemente en los valles. La temperatura media que demanda es de 18 a 25 °C (27.5 °C), media máxima de 28 a 36 ° y temperatura media mínima de 13 a 22 °C; la precipitación de 800 hasta 2000 mm, sin embargo, para crecer bien necesita por lo menos de 800 hasta 1000 mm (CONABIO-CONAFOR, 2003c; OFI-CATIE, 2004).

### ***Pinus pseudostrobus* Lindl.**

Su rango de distribución altitudinal varía entre 2400 y 2800 msnm, e incluso en laderas de montaña con elevaciones de 1600 a 3200 msnm; con precipitaciones anuales entre 800 y 1500 mm (algunos autores mencionan de 500 a 2000 mm), temperaturas entre 18 a 21 °C. La temperatura máxima promedio es de 20 a 26 °C; la mínima de 6 a 12 °C y la temperatura media de 12 a 19 °C. Crece en suelos profundos (1 a 3 m) derivados de material volcánico, con pH neutro, ácidos a moderadamente ácidos (4.5 a 7); no crece en suelos con problemas de drenaje

y se desarrolla en suelos con texturas medias a gruesas (López y Mateo, 2011; Marlés et al., 2015; Sáenz et al., 2011; Viveros et al., 2005).

### ***Pinus ayacahuite* Ehrenb.**

Es una especie arbórea que se encuentra en altitudes entre 1800 a 3200 m. Es más frecuente en exposiciones norte y noreste, en lugares húmedos, preferiblemente cañadas. Prefiere sitios con precipitaciones entre 1000 a 3100 mm (en algunos casos hasta 700 mm) por año y temperaturas promedio anual entre 12 a 19 °C, mínima de -8 °C y máxima de 35 °C. Es más común en suelos de tipo andosol bien drenado a moderadamente drenado, con textura arenolimoso, franco arcilloso y franco limoso y franco arenoso, con profundidad de 0.30 a 2 m, hasta 3 m en valles; con pH de 4.3 a 8. No se adapta al calor y ambientes áridos, crece muy bien en condiciones frías y de mucha humedad (CONABIO-COMAFOR, 2003d; López y Mateo, 2011).

### ***Pinus patula* Schl. et Cham**

Es una especie nativa de regiones subtropicales de México, se distribuye de manera natural en el centro y sur del país, cuyo límite altitudinal de distribución es de 1500 a 3750 m. La precipitación total anual en el área de distribución de *Pinus patula* Schl. et Cham es de 1000 a 1500 mm, con un máximo de 2500 mm, y el óptimo oscila entre los 1800 y 2400 mm, la mínima puede llegar hasta 500 mm; la temperatura media anual oscila de 10 a 20 °C, con una temperatura mínima extrema de -14 °C y una máxima extrema de 40 °C. Se desarrolla en suelos de tipo acrisoles y luvisoles profundos (de 0.40 a 2 m), con textura arenosa a arcillosa y porosa (aunque es muy variado); con pH ácido de 5.0 a 5.5, pero en algunos casos llega de 3.8 a 6.6 (CONABIO-CONAFOR, 2003e; López y Mateo, 2011; Muñoz et al., 2010; Ospina et al., 2011; Sáenz et al., 2011; Vela et al., 2008).

### ***Pinus douglasiana* Martínez**

Se distribuye en las zonas subtropicales y templado-cálidas del Oeste y centro de México, en la sierra madre occidental, se prolonga hasta la vertiente del Océano Pacífico a través de la sierra madre del Sur y sierra madre de Chiapas. La altitud media en donde se distribuye es de 2000 m (más frecuente), la mínima de 1100 m y máxima de 2800 m. La temperatura media anual va de 17 a 23 °C, mínima de -2 °C y máxima de 44 °C. La precipitación media en la que se desarrolla esta especie es de 1150 mm, mínima de 700 mm y máxima de 1600 mm. Se desarrolla en suelos de tipo litosoles, cambisoles y luvisoles moderadamente profundos a profundos, con textura franca, areno-limosa y areno-arcillosa (aunque este suele ser muy variado) de moderadamente drenados a bien drenados; cuyo pH requerido por la especie es de 5 a 6.5 (CONABIO-CONAFOR, 2003f; PRODEFO, 2011; Rueda et al., 2006).

### ***Pinus leiophylla* Schl. & Cham.**

Especie cuyo árbol es de 20 a 30 m de altura y de 35 a 80 m de diámetro normal. Se encuentra a una altitud desde los 1600 a 3000 m, pero más frecuentemente de 2200 a 2750 m. La precipitación presente en el área donde crece es de 600 a 1500 mm. La temperatura media anual de 14 a 18 °C, con mínima de -15 y máxima de 38 °C. Se desarrolla en suelos con buen drenaje de origen calizo o volcánico, con textura migajón-arenosa. Suelos delgados hasta 30 cm de profundidad. Crece en suelos con pH de 5.5 a 6.5 (CONABIO-CONAFOR, 2003g; López y Mateo, 2011).

#### **3.4.5 Análisis multicriterio: Lógica difusa y Proceso Jerárquico Analítico**

Se desarrollaron modelos sobre áreas potenciales para plantaciones forestales comerciales a través del Método de Evaluación Multicriterio conocido como Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) combinado con la Lógica Difusa. El AHP

está integrado por un objetivo principal que es la obtención de áreas potenciales para las especies elegidas, de este objetivo se desglosaron los tres criterios, nueve subcriterios y las variables restrictivas.

### **Lógica difusa**

La estandarización de los subcriterios es necesario para que estos sean comparables unos con otros, dado que los factores ambientales identificados están en diferentes unidades dimensionales, por lo que fue necesario transformarlos a una unidad común para su análisis posterior.

Las capas vectoriales se convirtieron a archivos ráster en el SIG QGIS; se estandarizaron todas las capas con el uso de la lógica difusa (asignando valores de 0 a 1) tomando en cuenta los requerimientos ambientales de las especies forestales seleccionadas mediante el empleo de funciones de pertenencia difusa trapezoidales y triangulares, esto se realizó con la herramienta Fuzzify de QGIS. Con el uso de la lógica difusa se redujo el grado de incertidumbre mediante las funciones de membresía, y permitió especificar el grado de pertenencia de cada píxel de un mapa (archivo ráster) durante la definición de la aptitud del terreno.

### **Proceso Jerárquico Analítico**

En la ponderación de los criterios y subcriterios, se consultó la literatura existente sobre este tema para la asignación de pesos o grado de importancia de cada uno de ellos. Con base a eso se obtuvo un promedio de dichos pesos y es la que se empleó, los cuales fueron derivados de encuestas aplicadas a expertos en el establecimiento de plantaciones forestales, dónde cada persona entrevistada completó matrices de comparación pareada, diseñadas ex profeso según Saaty (1980), donde los índices de consistencias, este último debe de ser menor de 0.10 para que sea considerado como adecuado (Aguirre et al., 2015; Bustillos et

al., 2007; Ceballos-Silva & López-Blanco, 2010; Delgado et al., 2010; Muñoz et al., 2011; Muñoz et al., 2015; Olivas et al., 2007; Silva et al., 2016).

Los subcriterios estandarizados se multiplicaron por los pesos consultados en la literatura, obteniendo como resultado un mapa correspondiente al subcriterio ponderado. Posteriormente estos mapas se sumaron para obtener un mapa de aptitud del terreno tomando en cuenta solamente un criterio (clima), por lo que este procedimiento se repitió para los otros dos criterios: suelo y topografía.

Después se ponderaron los tres criterios usando los valores obtenidos en la literatura y se agregaron los tres criterios con el fin de obtener el mapa de aptitud final para plantaciones. Por último, éste mapa resultante se multiplicó por un mapa binario (obtenido con la aplicación del álgebra booleana) con la finalidad de eliminar las áreas que no se pueden utilizar para establecer plantaciones, estas variables limitantes corresponden a los cuerpos de agua, ríos y arroyos, tipo de suelo, carreteras y caminos, zonas pobladas, pendientes mayores a 35 % y zonas boscosas.

Al final se realizó una reclasificación del mapa (archivo ráster) para facilitar la interpretación de los resultados finales, para ello se emplearon tres clases para indicar la potencialidad: alta, media y baja.

Se desarrolló un segundo escenario donde todos los criterios y subcriterios se les asignó el mismo grado de importancia. Por lo tanto, se desarrollaron dos escenarios de decisión diferentes para cada especie, una con pesos iguales y otra con pesos diferentes desarrollando en total 16 modelos.

### 3.5 Resultados y discusión

En el desarrollo del análisis multicriterio se emplearon tres criterios y nueve subcriterios, donde los expertos en plantaciones mencionan que el criterio más importante es el clima, seguido por el suelo y finalmente la topografía. Los subcriterios más relevantes fueron la precipitación, la profundidad del suelo, la altitud y la pendiente. Los pesos obtenidos de la literatura para cada una de las variables fueron las siguientes: precipitación (0.5), temperatura media (0.18), temperatura mínima (0.17), temperatura máxima (0.15), pH (0.304), profundidad del suelo (0.439), textura (0.251), altitud (0.551) y pendiente (0.448) (Aguirre et al., 2015; Bustillos et al., 2007; Ceballos-Silva & López-Blanco, 2010; Delgado et al., 2010; Olivas et al., 2007; Silva et al., 2016).

La Tabla 3 muestra el resumen de los resultados obtenidos en el primer escenario (pesos diferentes), en la cual se menciona la superficie con alto, mediano y bajo potencial para cada especie. La mayor superficie con aptitud alta le corresponde a *Cedrela odorata* L. con 4690 ha, seguido de *Pinus patula* Schl. et Cham con 3793 ha y *Swietenia humilis* Zucc con 3114 ha.

**Tabla 3. Áreas óptimas para el establecimiento de plantaciones (escenario 1).**

Especies	Clases de aptitud		
	Alta (ha)	Media (ha)	Baja (ha)
<i>C. odorata</i> L.	4689.810	19086.819	18545.487
<i>S. humilis</i> Zucc.	3113.764	44388.781	13103.739
<i>T. rosea</i> (Bertol.) DC	1505.331	11550.832	31444.541
<i>P. ayacahuite</i> Ehrenb.	2013.310	2550.952	880.080
<i>P. douglasiana</i> Martínez	1399.231	2824.913	1491.958
<i>P. leiophylla</i> Schl. & Cham.	670.091	964.819	2195.581
<i>P. maximinoi</i> H.E.Moore	1448.009	3136.935	1633.960
<i>P. patula</i> Schl. et Cham	3792.985	965.496	790.145
<i>P. pseudostrobus</i> Lindl.	1470.138	2753.003	887.546

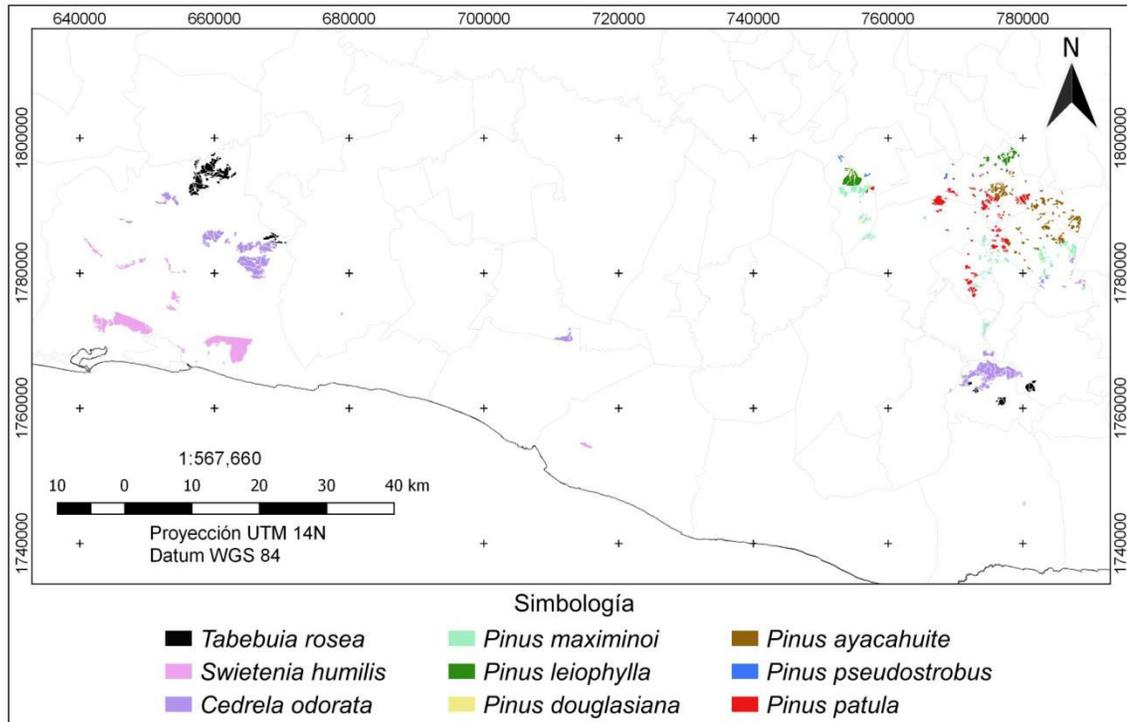
En la Tabla 4 se indica los resultados del segundo escenario donde se les dio la misma importancia a todas las variables ambientales, obteniendo como resultado una mayor superficie de aptitud alta para *Cedrela odorata* L. (4839 ha), seguido de *Pinus patula* Schl. et Cham (3793 ha) y *Swietenia humilis* Zucc. (3114 ha).

**Tabla 4. Áreas óptimas para el establecimiento de plantaciones (escenario 2).**

Especies	Clases de aptitud		
	Alta (ha)	Media (ha)	Baja (ha)
<i>C. odorata</i> L.	4839.472	20408.168	20490.546
<i>S. humilis</i> Zucc.	3113.764	45000.352	14490.124
<i>T. rosea</i> (Bertol.) DC	1505.331	11632.239	31963.241
<i>P. ayacahuite</i> Ehrenb.	2011.424	4100.326	9216.177
<i>P. douglasiana</i> Martínez	1399.231	26059.125	34481.177
<i>P. leiophylla</i> Schl. & Cham.	670.091	964.819	34269.417
<i>P. maximinoi</i> H.E.Moore	1704.077	16712.867	26635.731
<i>P. patula</i> Schl. et Cham	3792.985	4926.347	42546.286
<i>P. pseudostrobus</i> Lindl.	1470.138	2753.003	25242.911

En los dos escenarios de decisión desarrollado, se destaca que las especies presentaron resultados similares, obteniendo una mayor superficie óptima alta para tres especies: *Cedrela odorata* L., *Pinus patula* Schl. et Cham y *Swietenia humilis* Zucc.; y una menor superficie para *P. leiophylla* Schl. & Cham. En la aptitud media *Swietenia humilis* Zucc. presentó mayor superficie, *Pinus leiophylla* Schl. & Cham. y *P. Patula* Schl. et Cham presentaron una menor superficie; la superficie de baja aptitud es mayor para *T. rosea* (Bertol.) DC y menor para *P. patula* Schl. et Cham. Sin embargo se debe de realizar una verificación de la zona antes de establecer las plantaciones.

En la Figura 7 se presenta la distribución espacial de las áreas de aptitud alta considerando el primer escenario de decisión (pesos diferentes), y en el apartado de Anexo se presenta de manera detallada los tres niveles de aptitud para cada especie.



**Figura 7. Áreas con alto potencial para las especies forestales maderables.**

La asignación de pesos a cada uno de los criterios y subcriterios de evaluación en la metodología del AHP conjuntamente con la combinación de la lógica difusa, permite elegir áreas que, aunque no reúnen la totalidad de las demandas de los requerimientos ecológicos de las especies, esta le asigna un grado de aptitud ya sea media o baja. Con esta técnica es posible clasificar casi en su totalidad el área de influencia. Al separar en clases de aptitud, los resultados muestran una transición gradual, tal como lo mencionan García-Nieto, Moreno-Sánchez, López-Blanco, Villers-Ruiz y García-Daguer (2004), además el enfoque difuso permite una mejor representación de la variabilidad espacial de la información cartográfica continua.

### **3.6 Conclusiones**

La evaluación multicriterio AHP-lógica difusa, ayudó a evaluar el potencial de la tierra para diversas especies maderables de interés comercial mediante la integración de variables ambientales en un sistema de información geográfica. El AHP-lógica difusa en combinación con los SIG utilizados en este trabajo, son herramientas útiles, pero la calidad de los resultados depende en gran medida de la información cartográfica, la opinión de expertos y la información incorporada sobre los requerimientos de las especies.

Los resultados obtenidos para la región analizada permiten probar que hay áreas con las condiciones climáticas, edáficas y fisiográficas favorables para el desarrollo de proyectos de plantaciones, aunque quedó pendiente la verificación de los resultados en campo. La información sobre las opiniones de expertos obtenidos de la revisión de literatura, y los requerimientos ecológicos de las especies se combinaron para definir los grados de aptitud para las especies de latifoliadas y las especies de coníferas, y del cual se concluyó que la variable más importante e influyente en la definición de aptitud de terrenos para plantaciones forestales es el clima, de ella principalmente la precipitación pluvial. Los resultados obtenidos proveen información valiosa como apoyo a los procesos de la toma de decisiones inmersos en la planeación de programas y proyectos de plantaciones forestales comerciales de la región.

## 4. CONCLUSIONES GENERALES

La geomática, los sistemas de información geográfica, la técnica de análisis multicriterio (basado en la teoría de toma de decisiones), así como la geoestadística han sido ampliamente utilizados en diversas disciplinas, una de ellas es en la planificación de las actividades forestales o el manejo de los recursos naturales. La percepción remota es una herramienta de apoyo que ha sido utilizado de manera considerable en los últimos años para facilitar las diversas actividades en la gestión, planeación, ejecución, manejo y monitoreo de los recursos naturales, motivo por la que se ha hecho indispensable el uso de esta nueva tecnología para dar solución a problemas.

Por otra parte, el análisis multicriterio desempeña un papel muy importante en el ámbito forestal conjuntamente con otras herramientas que a través del desarrollo de los sistemas de información geográfica se han estado empleando para la definición de áreas potenciales de un determinado objetivo o varios objetivos (sistemas agroforestales, plantaciones, reforestación, áreas de resinación, productividad), ya sea mediante el uso de las técnicas clásicas de superposición booleana o de técnicas de inteligencia artificial, o una combinación de ambas para lograr una mayor eficiencia en el objetivo deseado.

En la primera parte de este trabajo se planteó como hipótesis que las plantaciones forestales comerciales del sur del estado de Oaxaca establecidas del 2000 a 2014 han tenido éxito, para ello se consideró la evaluación de la dinámica de la vegetación correspondiente a las plantaciones mediante las técnicas empleadas en la Geomática. El estudio de la dinámica de la vegetación se abordó mediante el uso de índices espectrales, en específico del NDVI, mediante el análisis de la serie temporal de tres periodos diferentes. Después de realizar las evaluaciones, a través de los valores del NDVI se determinó que la mayoría de las plantaciones forestales han tenido resultados favorables. Además, se planteó que a través de la dinámica de vegetación se puede

determinar los factores ambientales que influyen en su crecimiento y desarrollo, para ello se utilizó el análisis de correspondencia canónica obteniendo como resultado que la mayoría de los factores que se tomaron en cuenta están relacionados con la vegetación.

En el último capítulo de este trabajo se planteó que existen áreas adecuadas para establecer plantaciones con las especies nativas que tienen algún interés económico en el sur del estado de Oaxaca, donde a través del análisis multicriterio AHP en combinación con la lógica difusa se determinó que existen áreas adecuadas para el establecimiento de las especies consideradas.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

- Aguaron, J., & Moreno-Jiménez, J. M. (2003). The geometric consistency index: Approximated thresholds. *European journal of operational research*, 147(1), 137-145.
- Aguirre-Salado, C. A., Valdéz-Lazalde, J. R., Sánchez-Díaz, G., Miranda-Aragón, L., & Aguirre-Salado, A. I. (2015). Modelling site selection for tree plantation establishment under different decision scenarios. *Journal of Tropical Forest Science* 27(3), 298-313.
- Alatorre, L. C., Beguería, S., & Vicente-Serrano, S. M. (2010). Análisis de la evolución espacio-temporal del NDVI sobre áreas vegetadas y zonas de riesgo de erosión en el Pirineo Central. *Pirineos*, 165, 7-27.
- Ali, I., Cawkwell, F., Dwyer, E., Barrett, B., & Green, S. (2016). Satellite remote sensing of grasslands: from observation to management. *Journal of Plant Ecology*, 9(6), 649-671.
- Anaya-Acevedo, J. A., & Valencia-Hernández, G. M. (2013). Fenología de ambientes tropicales en el marco de la Teledetección. *Geofocus: Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, (13), 13.
- Badii, M.H., J. Castillo, K., Cortez, Wong A., & Villalpando, P. (2007). Análisis de correlación canónica (ACC) e investigación científica (Canonical correlation analysis and scientific research). *Innovaciones de negocios*, 4(8), 405-422.
- Barua, S. K., Lehtonen, P., & Pahkasalo, T. (2014). Plantation vision: potentials, challenges and policy options for global industrial forest plantation development. *International Forestry Review*, 16(2), 117-127.
- Berkes, F., & Berkes, M. K. (2009). Ecological complexity, fuzzy logic, and holism in indigenous knowledge. *Futures*, 41(1), 6-12.
- Bojadziev, G., & Bojadziev, M. (2007). *Fuzzy logic for business, finance, and management* (Vol. 23). World Scientific.

- Bunruamkaew, K., & Murayam, Y. (2011). Site suitability evaluation for ecotourism using GIS & AHP: A case study of Surat Thani province, Thailand. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 21, 269-278.
- Bustillos-Herrera, J. A., Valdez-Lazalde, J. R., Aldrete, A., & González-Guillén, M. de J. (2007). Aptitud de terrenos para plantaciones de eucalipto (*Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden): Definición mediante el proceso de análisis jerarquizado y SIG. *Agrociencia*, 41(7).
- Buzai, G. D. (2013). Sistemas de información geográfica SIG: teoría y aplicación. Universidad Nacional de Luján. *Geografía*. Argentina. ISBN 978-987-9285-43-5, 19-32.
- Caha, J., & Burian, J. (2018). Comparison of Fuzzy AHP Algorithms for Land Suitability Assessment. In *Proceedings of GIS Ostrava*, Springer, Cham, 31-46.
- Castillo-Ramiro, J. J., Gama, L., & Zequeira-Lairos, C. (2015). Análisis de regresión lineal en un sistema de información geográfico para determinar la tasa de deforestación en el estado de Tabasco. *Kuxulkab'*, 15(27).
- Ceballos-Silva, A. P., & López-Blanco, J. (2010). Delimitación de áreas adecuadas para cultivos de alternativa: una evaluación multicriterio-SIG. *Terra latinoamericana*, 28(2), 109-118.
- Cintrón, B. B. (1990). *Cedrela Odorata* L. Cedro, Spanish cedar. En: Burns, Russell M.; Honkala, Barbara H., eds. *Silvics of North America: 2. Hardwoods*. Agric. Handb. 654. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service: 250-257.
- Colson, G., & De Bruyn, C. (2014). *Models and methods in multiple criteria decision making* (Vol. 23). Elsevier.
- CONABIO-CONAFOR. (2003a). *Tabebuia rosea* (Bertol) DC.
- CONABIO-CONAFOR. (2003b). *Cedrela odorata* L.
- CONABIO-CONAFOR. (2003c). *Swietenia humillis* Zucc.
- CONABIO-CONAFOR. (2003d). *Pinus ayacahuite* Ehren.
- CONABIO-CONAFOR. (2003e). *Pinus patula* Schl. et Cham.
- CONABIO-CONAFOR. (2003f). *Pinus douglasiana* Martínez

- CONABIO-CONAFOR. (2003g). *Pinus leiophylla* Schl. & Cham.
- Córdova, K., Delgado, L., & Ramos, S. (2014). Cambios en el Índice de Vegetación-NDVI y en los valores de Temperatura superficial-LST, vinculados socio-productivos y a la variabilidad climática ENSO en el Parque Nacional Laguna de Tacarigua-PNLT, Venezuela. 18 p.
- Crawley, M. J. (2013). *The R book*, Second edition.
- Cuadras, C. M. (2014). *Nuevos métodos de análisis multivariante*, CMC Editions.
- Cubbage, F., Mac-Donagh, P., Balmelli, G., Morales-Olmos, V., Bussoni, A., Rubilar, R., & Murara, M. (2014). Global timber investments and trends, 2005-2011. In *New Zealand Journal of Forestry Science*, 44(S1), 1-12.
- De Moraes-Gonçalves, J. L., Duque-Silva, L., Behling, M., & Alcarde-Alvares, C. (2014). Management of Industrial Forest Plantations. *Managing Forest Ecosystems*, 91-119.
- Delgado-Caballero, C. E., Valdez-Lazalde, J. R., Fierros-González, A. M., de los Santos-Posada, H. M., & Gómez-Guerrero, A. (2010). Aptitud de áreas para plantaciones de eucalipto en Oaxaca y Veracruz: proceso de análisis jerarquizado vs. álgebra booleana. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 1(1), 123-133.
- Dragičević, S., Dujmović, J., & Minardi, R. (2018). Modeling Urban Land-Use Suitability with Soft Computing: The GIS-LSP Method. In *GeoComputational Analysis and Modeling of Regional Systems*, 257-275.
- Duarte-C., E., Emanuelli-A., P., Milla-A., F., Orellana, O., López, S., & Quiroz-H., A. (2016). Análisis de cambios de la cobertura forestal y uso de la tierra mediante imágenes satelitales de alta resolución especial: años 2009-2012-2015. Costa Rica. 48 p.
- Eckert, S., Kellenberger, T. W., & Lencinas, J.D. (2005). Classification and forest parameter extraction of Patagonian Lenga forests with ASTER and Landsat ETM+ Data. Global Priorities in Land Remote Sensing. Sioux Falls, South Dakota, USA. *Proceedings PECORA* (16), 23-27.

- Escárpita-Herrera, J. (1978). Plantaciones forestales. Aspectos generales de la plantación comercial de la "Sabana", en el estado de Oaxaca. *Instituto Nacional de Ecología*, 424-437.
- Escribano-Rodríguez, J. A., Díaz-Ambrona, C. G. H., & Tarquis-Alfonso, A. M. (2015). Selección de índices de vegetación para la estimación de la producción herbácea en Dehesas. *Revista pastos*, 44(2), 6-18.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). (2010). Evaluación de los recursos forestales mundiales 2010: Informe principal (Informe general). FRA2010/041. Roma, Italia. 346 p.
- FAO. (2016). El Estado de los bosques del mundo 2016. Los bosques y la agricultura: desafíos y oportunidades en relación con el uso de la tierra. Roma. 137 p.
- Farfán V., F. (2012). Árboles con potencial para ser incorporados en sistemas agroforestales con café.
- Feizizadeh, B., Roodposhti, M. S., Jankowski, P., & Blaschke, T. (2014). A GIS-based extended fuzzy multi-criteria evaluation for landslide susceptibility mapping. *Computers & geosciences*, 73, 208-221.
- Fernández-Eguiarte, A., Romero-Centeno, R., & Zavala-Hidalgo, J. (2012). Atlas Climático de México y Áreas Adyacentes. Unidad de Informática para las Ciencias Atmosféricas y Ambientales. Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM, Servicio Meteorológico Nacional, Comisión Nacional del Agua. México, D.F., México. 204 p.
- Follador, M., Villa, N., Paegelow, M., Renno, F., & Bruno, R. (2008). Tropical deforestation modelling: comparative analysis of different predictive approaches. In *Modelling Environmental Dynamics*, 77-107.
- Fu, H. P., Yeh, H., & Ma, R. L. (2017). A study of the CSFs of an e-cluster platform adoption for microenterprises. *Information Technology and Management*, 1-13.
- Galán L., R., de los Santos P., H. M., y Valdez H., J. I. (2008). Crecimiento y rendimiento de *Cedrela odorata* L. y *Tabebuia donnell-smithii* Rose en San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca. *Madera y bosques*, 14(2), 65-82.

- García-Nieto, H., García-D., R. R., Moreno-Sánchez, R., López-Blanco, J., & Villers-Ruíz, M. de L. (2001). Enfoques Fuzzy y Booleano convencional para clasificar la aptitud agrícola de las tierras. *Agricultura Técnica en México*, 27(2), 107-118.
- García-Nieto, H., Moreno-Sánchez, R., López-Blanco, J., Villers-Ruíz, M. de L., & García-Daguer, R. R. (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.
- Gayen, A., & Saha, S. (2017). Deforestation probable area predicted by logistic regression in Pathro river basin: a tributary of Ajay river. *Spatial Information Research*, 26(1), 1-9.
- Gilabert, M. A., González-Piqueras, J., García Haro, F. J., & Meliá, J. (2002). A generalized soil-adjusted vegetation index. *Remote Sensing of environment*, 82(2), 303-310.
- Golubov-Figueroa, J., Mandujano, M. C., Guerrero-Eloisa, S., Mendoza-Alfaro, R., Koleff-Osorio, P., González-Martínez, A. I., ...Born-Schmidt, G. (2014). Análisis multicriterio para ponderar el riesgo de las especies invasoras, en R. Mendoza y P. Koleff (coords.). *Especies acuáticas invasoras en México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad*, México, 123-133.
- Gray, S. A., Gray, S., Cox, L. J., & Henly-Shepard, S. (2013). Mental modeler: a fuzzy-logic cognitive mapping modeling tool for adaptive environmental management. In *System sciences (hicss), 2013 46th Hawaii international conference on* (pp. 965-973). IEEE.
- Guariguata, M. R., Arce, J., Ammour, T., & Capella, J. L. (2017). Las plantaciones forestales en Perú: Reflexiones, estatus actual y perspectivas a futuro. *Center for International Forestry Research (CIFOR)*, Bogor, Indonesia. Vol. 169.
- Guo, B., Zhou, Y., Wang, S. X., & Tao, H. P. (2014). The relationship between normalized difference vegetation index (NDVI) and climate factors in the

- semiarid region: A case study in Yalu Tsangpo River basin of Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Mountain Science*, 11(4), 926-940.
- Hanine, M., Boutkhom, O., Agouti, T., & Tikniouine, A. (2017). A new integrated methodology using modified Delphi-fuzzy AHP-PROMETHEE for Geospatial Business Intelligence selection. *Information Systems and e-Business Management*, 15(4), 897-925.
- Herrera C., E. E. (2015). *Tabebuia rosea* (Bertol) DC., un árbol de color rosa y sus usos tradicionales.
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., & Ferreira, L. G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote sensing of environment*, 83(1), 195-213.
- INEGI. (2008). Conjunto de datos vectoriales. Obtenido de Humedad del suelo, escala 1:250000. <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/clima/infoescala.aspx> (enero de 2018).
- INEGI. (2008). Conjunto de datos Vectoriales. Unidades Climáticas escala 1:1000000. <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/clima/infoescala.spx> (enero de 2018).
- INEGI. (2015). Conjunto de datos vectoriales. Obtenido de Uso del suelo y Vegetación, serie VI escala 1:250000. <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/usosuelo/> (enero de 2018).
- INEGI. (2015a). Guía para la interpretación de Cartografía Edafológica.
- INEGI. (2016). Anuario estadístico y geográfico por entidad federativa 2016. Ags., Méx.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2005). Obtenido de Modelo Digital de Elevación de Alta Resolución LÍDAR, escala 1:50000. <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/presentacion.aspx> (enero de 2018).
- Jacques, D. C., Kergoat, L., Hiernaux, P., Mougin, E., & Defourny, P. (2014). Monitoring dry vegetation masses in semi-arid areas with MODIS SWIR bands. *Remote sensing of environment*, 153, 40-49.

- Jhariya, D. C., Kumar, T., Gobinath, M., Diwan, P., & Kishore, N. (2016). Assessment of groundwater potential zone using remote sensing, GIS and multi criteria decision analysis techniques. *Journal of the Geological Society of India*, 88(4), 481-492.
- Jofré, P., Büchner, C., Ipinza, R., Bahamondez, C., Barros, S., García, P., & Cabrera, J. (2013). Estado del arte las plantaciones forestales y el agua. *INFOR*, 12.
- Lam, P. K., & Chin, K. S. (2005). Identifying and prioritizing critical success factors for conflict management in collaborative new product development. *Industrial Marketing Management*, 34(8), 761-772.
- Lencinas, J. D., & Mohr-Bell, D. (2007). Estimación de clases de edad de las plantaciones de la provincia de Corrientes, Argentina, con base en datos satelitales Landsat. *Bosque (Valdivia)*, 28(2), 106-118.
- Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. W. (2008). Remote sensing and image interpretation. John Wiley & Sons, New York, USA. Sixth edition. 756 p.
- Liu, K. F. (2007). Evaluating environmental sustainability: an integration of multiple-criteria decision-making and fuzzy logic. *Environmental Management*, 39(5), 721-736.
- Liu, X. F., Zhang, J. S., Zhu, X. F., Pan, Y., Liu, Y., Zhang, D., & Lin, Z. (2014). Spatiotemporal changes in vegetation coverage and its driving factors in the Three-River Headwaters Region during 2000–2011. *Journal of Geographical Sciences*, 24(2), 288-302.
- López-Marrero, T., González-Toro, A., Heartsill-Scalley, T., & Hermansen-Báez, L.A. (2011). Evaluación multicriterio y sistemas de información geográfica para la planificación y la toma de decisiones acerca del uso de terrenos. [Guía]. Gainesville, FL: USDA Forest Service, Southern Research Station. 8 p.
- López-Pérez, A., Martínez-Menes, M. R., & Fernández-Reynoso, D. S. (2015). Priorización de áreas de intervención mediante análisis morfométrico e índice de vegetación. *Tecnología y ciencias del agua*, 6(1), 121-137.

- López-Z., G. A., & Mateo-S., J. J. (2011). Catálogo de árboles y arbustos, primera parte "Coniferales".
- Maldonado, Y., Trujillo, L., Duarte, M., García, E., & Reyes, D. (2016). Fuzzy logic based on Elvis-FPGA. 6 p.
- Marlès-M., J., Valor-I., T., López, B. C., Pérez-S., D. R., Maneja-Z., R., Sánchez-M., S. & Boada-J., M. (2015). "Análisis dendroclimático de *Pinus pseudostrobus* y *Pinus devoniana* en los municipios de Áporo y Zitácuaro (Michoacán), Reserva de la Biósfera de la Mariposa Monarca", Investigaciones Geográficas, Boletín, núm. 88, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 19-32.
- Martín, F., Corbera, J., Marchan, J. F., & Gonzáles, A. (2011). RapidEye and the Rededge band for modelling the vegetation and the recovery of the soil moisture. *Mapping*, 50, 10-20.
- Mejía-Bojórquez, J. M., García-Rodríguez, J. L., & Muñoz-Flores, H. J. (2015). Evaluación de plantaciones de cuatro especies forestales en el estado de Durango. 19 p.
- Meneses-Tovar, C. M. (2012). El índice normalizado diferencial de la vegetación como indicador de la degradación del bosque. *Unasyva: revista internacional de silvicultura e industrias forestales*, (238), 39-46.
- Merg, C., Petri, D., Bodoira, F., Nini, M., Fernández, M., Schmidt, F., & Selzer, F. (2011). Mapas digitales regionales de lluvias, índice estandarizado de precipitación e índice verde. *Revista Pilquen-Sección Agronomía*, (11), 5.
- Moreno-Jiménez, J. M. (2002). El proceso analítico jerárquico (AHP). Fundamentos, metodología y aplicaciones. Caballero, R. y Fernández, GM Toma de decisiones con criterios múltiples. RECT@. *Revista Electrónica de Comunicaciones y Trabajos de ASEPUMA*. Serie Monografías, (1), 21-53.
- Muñoz-F., H. J., Orozco-G., G., Coria-A., V. M., & García M., J. J. (2010). Factores ambientales de *Pinus patula* Schl. et Cham. y su adaptación a las condiciones de la Sierra Purépecha, Michoacán. *Foresta Veracruzana*, 12(2).

- Muñoz-F., H. J., Sáenz-R., J. T., & Rueda S., A. (2012). Monografía de especies forestales para plantaciones comerciales en clima tropical de Mich.
- Muñoz-Flores, H. J., Sáenz-Reyes, J. T., García-Magaña, J., Coria-Ávalos., V. M., & Muñoz-Vega, Y. Y. (2015). Áreas potenciales para establecer plantaciones comerciales de pino en la Sierra Purhépecha, Michoacán. *Foresta Veracruzana*, 17(2), 35-42.
- Muñoz-Flores, H. J., Sáenz-Reyes, J. T., García-Sánchez, J. J., Hernández-Máximo, E., & Anguiano-Contreras, J. (2011). Áreas potenciales para establecer plantaciones forestales comerciales de *Pinus pseudostrobus* Lindl. y *Pinus greggii* Engelm. en Michoacán. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 2(5), 29-44.
- Muñoz-Marcillo, J. L., Cuasquer-Fuel, E., Moncayo-Carreño, O., & Delgado-Campuzano, D. (2016). Aplicación de percepción remota para la detección de cambios en la cobertura boscosa de la reserva ecológica Mache-Chindul. *La Técnica: Revista de las Agrociencias*, (16), 76-93.
- Musálem, M. Á. (2006). Silvicultura de plantaciones forestales comerciales. Universidad Autónoma Chapingo. División de Ciencias Forestales. México, D.F., 2-16.
- OFI-CATIE. (2004). *Swietenia humillis* Zucc.
- Olaya, V. (2014). *Sistemas de información geográfica*. pp:65-200.
- Olivas-Gallegos, U. E., Valdez-Lazalde, J. R., Aldrete, A., González-Guillén, M. de J., & Vera-Castillo, G. (2007). Áreas con aptitud para establecer plantaciones de maguey cenizo: definición mediante análisis multicriterio y SIG. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 30 (4), 411-419.
- Ospina-P., C. M., Hernández-R., R. J., Andrea-R., E., Sánchez-O., F. A., Urrego-M., J. B., Rodas-P., C. A., ...Riaño H., N. M. (2011). El pino pátula. Guías silviculturales para el manejo de especies forestales con miras a la producción de madera en la zona andina colombiana.
- Overbeek, W., Kröger, M., & Gerber, J. F. (2012). An overview of industrial tree plantation conflicts in the global South. Conflicts, trends, and resistance struggles. *EJOLT Reports*, (3).

- Pachana, P. (2016). Forest stands volume estimation by using Finnish Multi-Source National Forest Inventory in Stołowe Mountains National Park. *Folia Forestalia Polonica*, 58(1), 3-12.
- Palestina, R. A., Equihua, M., & Pérez-Maqueo, O. M. (2015). Influencia de la complejidad estructural del dosel en la reflectancia de datos Landsat TM. *Madera y bosques*, 21(1), 63-75.
- Pérez-Rodríguez, F., Vargas-Larreta, B., Aguirre-Calderón, O. A., Corral-Rivas, J. J., & Rojo-Alboreca, A. (2013). Proceso analítico jerárquico para seleccionar métodos de manejo forestal en Durango. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 4(15), 55-72.
- PRODEFO. (2011). *Pinus douglasiana* Martínez. Pinus Monografías de pinos nativos promisorios para Plantaciones Forestales Comerciales en Jalisco, México. Documento Técnico.
- Pukkala, T. (2002). Multi-objective forest planning, managing forest ecosystems. Kluwer Academic Publishers, London, 206 p.
- Qu, Z., Wan, C., Yang, Z., & Lee, P. T. W. (2018). A Discourse of Multi-criteria Decision Making (MCDM) Approaches. In *Multi-Criteria Decision Making in Maritime Studies and Logistics*, 7-29.
- Rodríguez, L. C. E., Pasalodos-Tato, M., Díaz-Balteiro, L., & McTague, J. P. (2014). The Importance of Industrial Forest Plantations. *Managing Forest Ecosystems*, 3-26.
- Rodríguez-V., J. Sinaca-C., P., & Jamangapé-G., G. (2009). Frutos y semillas de árboles tropicales de México. Instituto Nacional de Ecología. Mexico.
- Ross, T. J. (2009). Fuzzy logic with engineering applications. John Wiley & Sons.
- Rueda-S., A., Ruiz-C., J. A., Flores-G., J. G., & Talavera-Z., E. (2006). Potencial Productivo para 11 especies de pino en Jalisco. Campo Experimental Centro Altos de Jalisco, CIRPAC, INIFAP. Libro Técnico Núm. 1. Guadalajara, México.
- Ryzhkova, V. A., Danilova, I. V., & Korets, M. A. (2016). Forest cover classification and geoinformation modeling of forest regeneration dynamics (Based on the

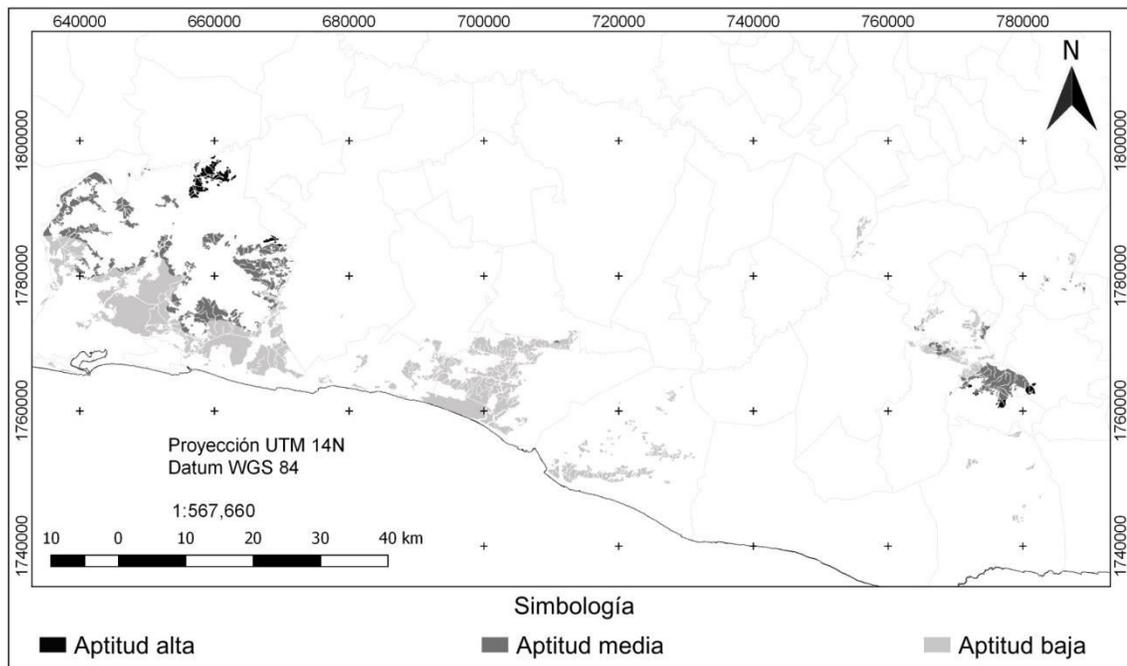
- example of the southern part of near-Yenisei Siberia). *Contemporary Problems of Ecology*, 9(6), 692-701.
- Ryzhkova, V., & Danilova, I. (2012). GIS-based classification and mapping of forest site conditions and vegetation. *Bosque*, 33(3).
- Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process*. McGraw Hill, New York.
- Saaty, T. L. (1995). Transport planning with multiple criteria: the analytic hierarchy process applications and progress review. *Journal of advanced transportation*, 29(1), 81-126.
- Saaty, T. L. (2013). The modern science of multicriteria decision making and its practical applications: The AHP/ANP approach. *Operations Research*, 61(5), 1101-1118.
- Sáenz, R. J. T., Muñoz, F. H. J., & Rueda, S. A. (2011). Especies promisorias de clima templado para plantaciones forestales comerciales en Michoacán. Libro Técnico Núm. 10 (p. 213). SAGARPA-INIFAP-CIRPAC-Campo Experimental Uruapan. Uruapan, Michoacán, México.
- Sakowska, K., Juszczak, R., & Gianelle, D. (2016). Remote sensing of grassland biophysical parameters in the context of the Sentinel-2 satellite mission. *Journal of Sensors*, 17 p.
- Salazar, R. (1997). *Tabebuia rosea* (Bertol) DC. Nota Técnica sobre Manejo de Semillas Forestales, CATIE, No. 8. 2 pp.
- Sami, M., Shiekhdavoodi, M. J., Pazhohanniya, M., & Pazhohanniya, F. (2014). Environmental comprehensive assessment of agricultural systems at the farm level using fuzzy logic: a case study in cane farms in Iran. *Environmental modelling & software*, 58, 95-108.
- Sandewall, M., Kassa, H., Wu, S., Khoa, P.V., He, Y., & Ohlsson, B. (2015). Policies to promote household based plantation forestry and their impacts on livelihoods and the environment: cases from Ethiopia, China, Vietnam and Sweden. *International Forestry Review*, 17(1), 98-111.
- Schlatter, J. E., & Gerding, V. (2014). Capítulo 10. Sitio forestal. In Donoso C, ME González, A Lara eds. *Ecología forestal. Bases para el manejo sustentable y conservación de los bosques nativos de Chile*. Chile. Ed. UACH, 309-319.

- Silva-Gallegos, J. J., Aguirre-Salado, C. A., Miranda-Aragón, L., Sánchez-Díaz, G., Valdez-Lazalde, J. R., Pedroza-Carneiro, J. W., & Flores-Cano, J. A. (2016). Locating Potential Zones for Cultivating *Stevia rebaudiana* in Mexico: Weighted Linear Combination Approach. *Sugar Tech*, 19(2), 206-218.
- Sosa-Cedillo, V. E., Torres-Rojo, J. M., Fierros-González, A. M., Hernández-Pérez, C., & Rodríguez-Romero, F. (2015). Programa de Desarrollo de Plantaciones Forestales Comerciales: A 15 años de su creación. Comisión Nacional Forestal, México. 151 p.
- Stephens, M. L., & Grist, P. (2014). Market failure for plantations: past experiences and emerging trends for delivering wood production and ecosystem services in Australia. *International Forestry Review*, 16(2), 205-215.
- Thapa, R., Thoms, M., & Parsons, M. (2016). An adaptive cycle hypothesis of semi-arid floodplain vegetation productivity in dry and wet resource states. *Ecohydrology*, 9(1), 39-51.
- Torres, E., Linares, G., Tenorio, M. G., Peña, R., Castelán, R., & Rodríguez, A. (2014). Índices de vegetación y uso de suelo en la región terrestre prioritaria 105: Cuetzalan, México. *Revista Iberoamericana de Ciencias*. ISSN 2334-2501. 12 p.
- Ullah, S., Si, Y., Schlerf, M., Skidmore, A. K., Shafique, M., & Iqbal, I. A. (2012). Estimation of grassland biomass and nitrogen using MERIS data. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 19, 196-204.
- Vaidya, O. S., & Kumar, S. (2006). Analytic hierarchy process: An overview of applications. *European Journal of operational research*, 169(1), 1-29.
- Vela G., L. (2008). *Pinus patula*, una importante especie mexicana de pino.
- Velázquez-Martínez, A., Fierros-González, A. M., Aldrete, A., Gómez-Guerrero, A., Fernández-Cázares, S., De los Santos-Posadas, H., & Ramírez-Herrera, C. (2013). Situación actual y perspectivas de las plantaciones forestales comerciales en México. CONAFOR. México.

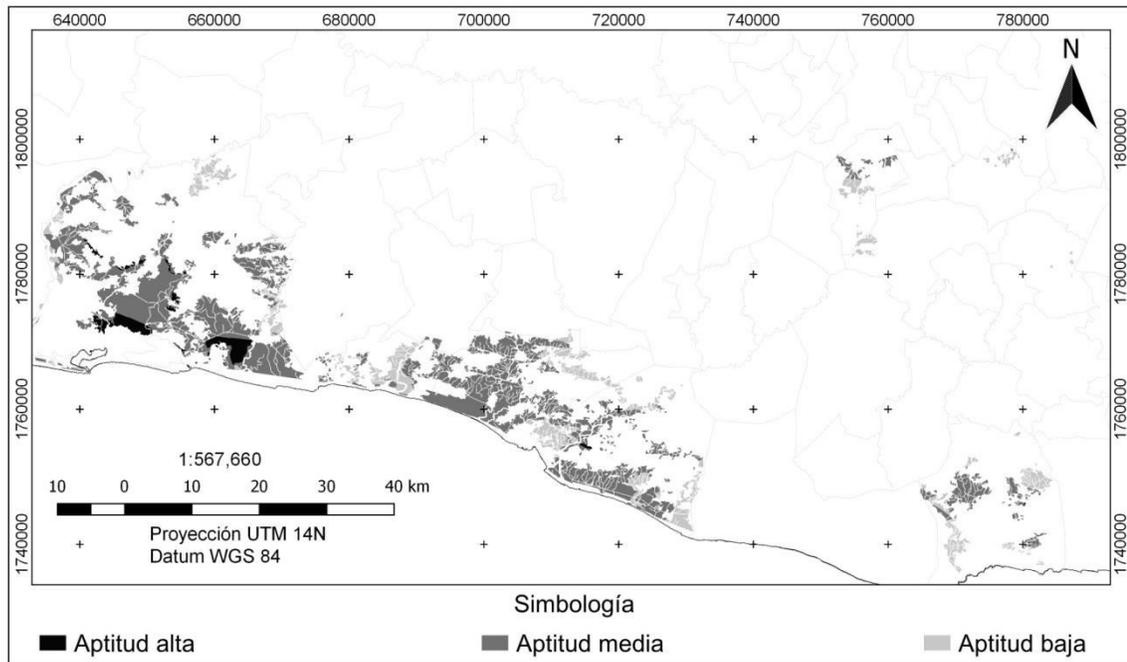
- Vicente-Serrano, S.M., Lasanta, T., & Romo, A. (2004). Analysis of the spatial and temporal evolution of vegetation cover in the Spanish central Pyrenees: the role of human management. *Environmental Management*, 34(6), 802-818.
- Viveros-Viveros, H., Sáenz-Romero, C., López-Upton, J., & Vargas-Hernández, J. J. (2005). Variación genética altitudinal en el crecimiento de plantas de *Pinus pseudostrobus* Lindl. en campo. *Agrociencia*, 39(5).
- Zhao, F., Xu, B., Yang, X., Jin, Y., Li, J., Xia, L., & Ma, H. (2014). Remote sensing estimates of grassland aboveground biomass based on MODIS net primary productivity (NPP): A case study in the Xilingol grassland of Northern China. *Remote sensing*, 6(6), 5368-5386.
- Zhao, Z., Gao, J., Wang, Y., Liu, J., & Li, S. (2015). Exploring spatially variable relationships between NDVI and climatic factors in a transition zone using geographically weighted regression. *Theoretical and Applied Climatology*, 120(3-4), 507-519.

## 6. ANEXO

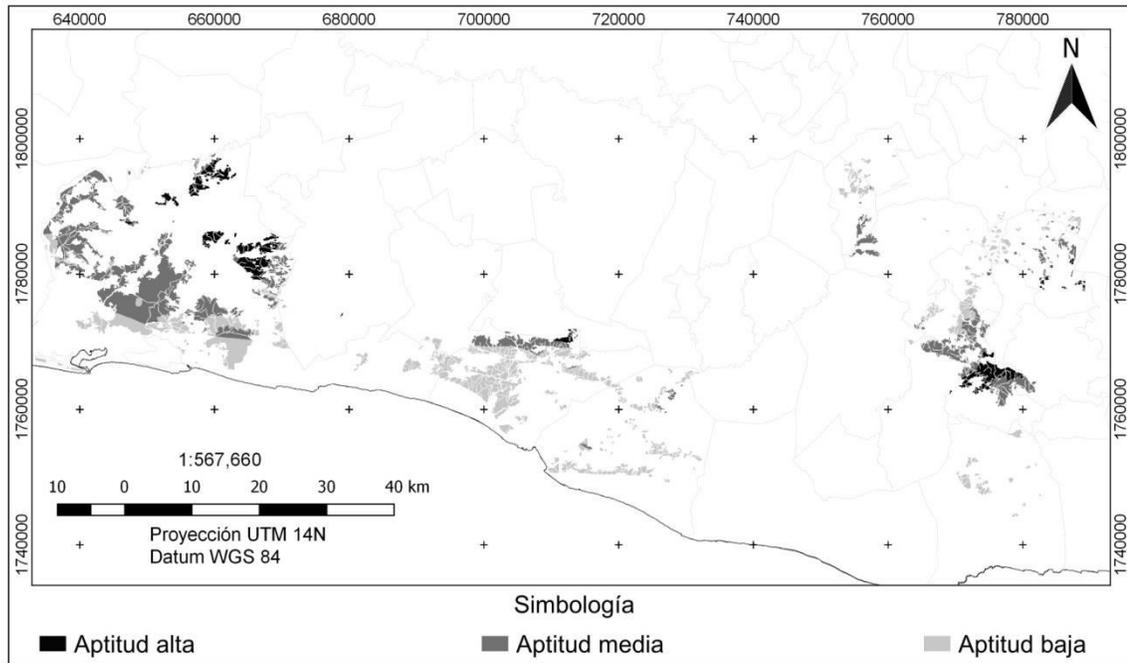
### Anexo 1. Áreas potenciales para *Tabebuia rosea* (Bertol.) DC.



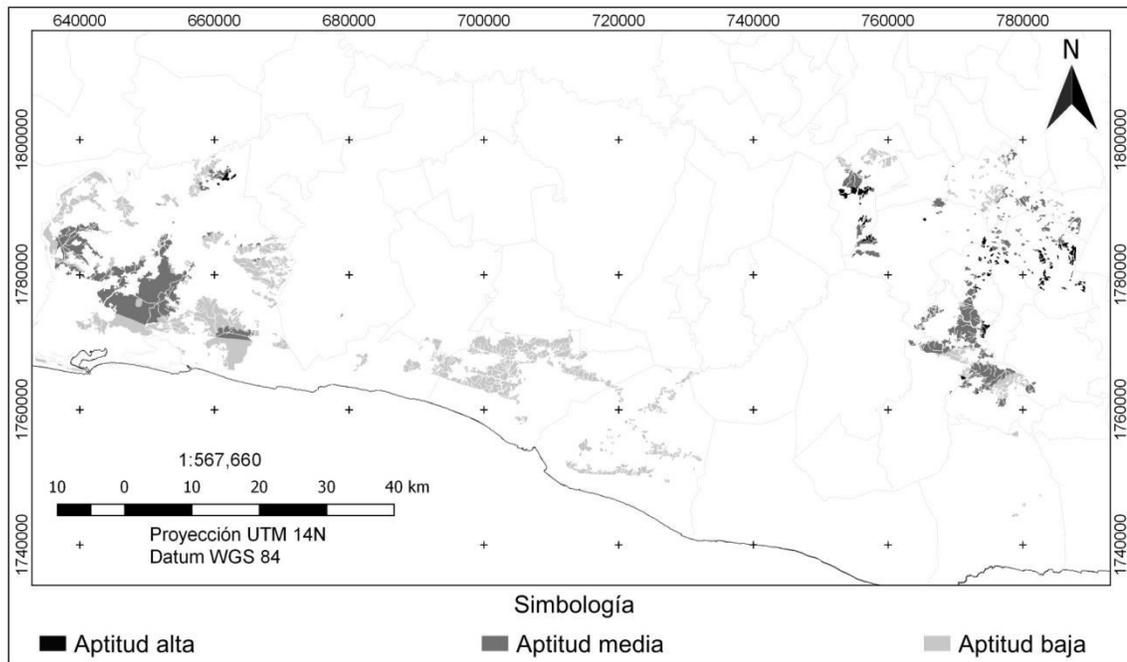
### Anexo 2. Áreas potenciales para *Swietenia humilis* Zucc.



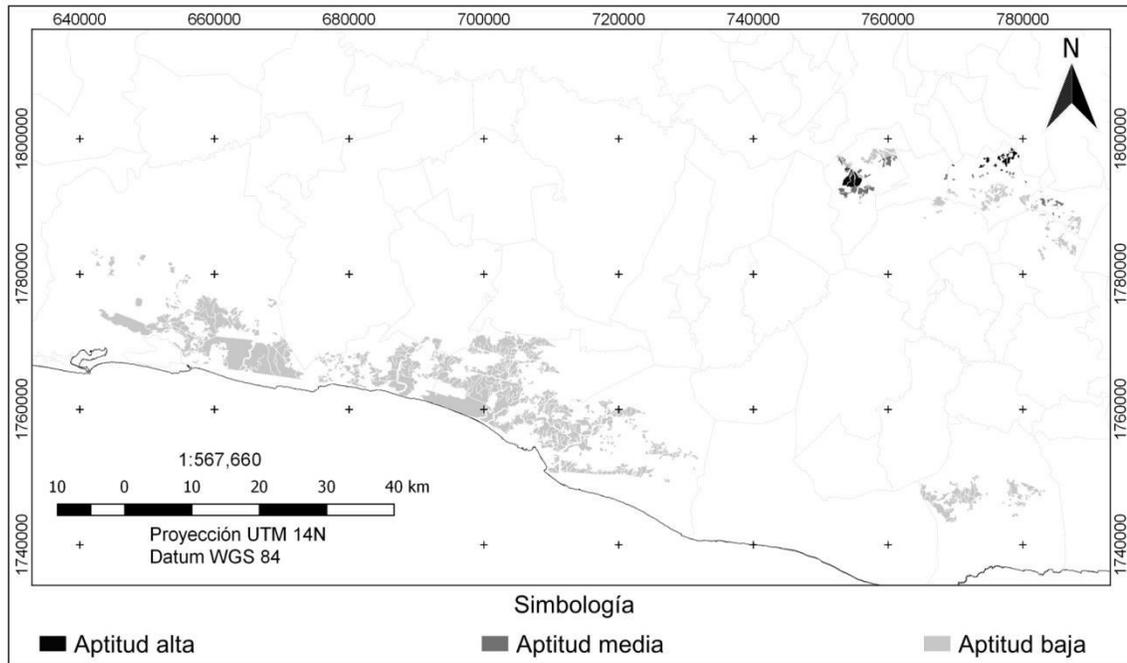
Anexo 3. Áreas potenciales para *Cedrela odorata* L.



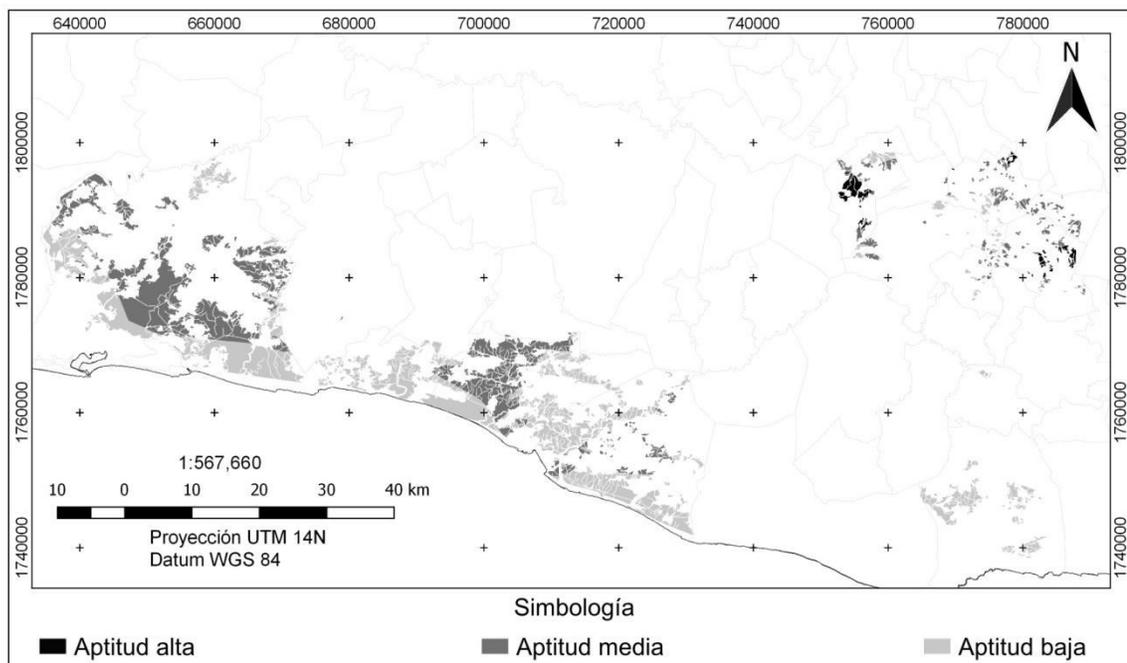
Anexo 4. Áreas potenciales para *Pinus maximinoi* H.E.Moore.



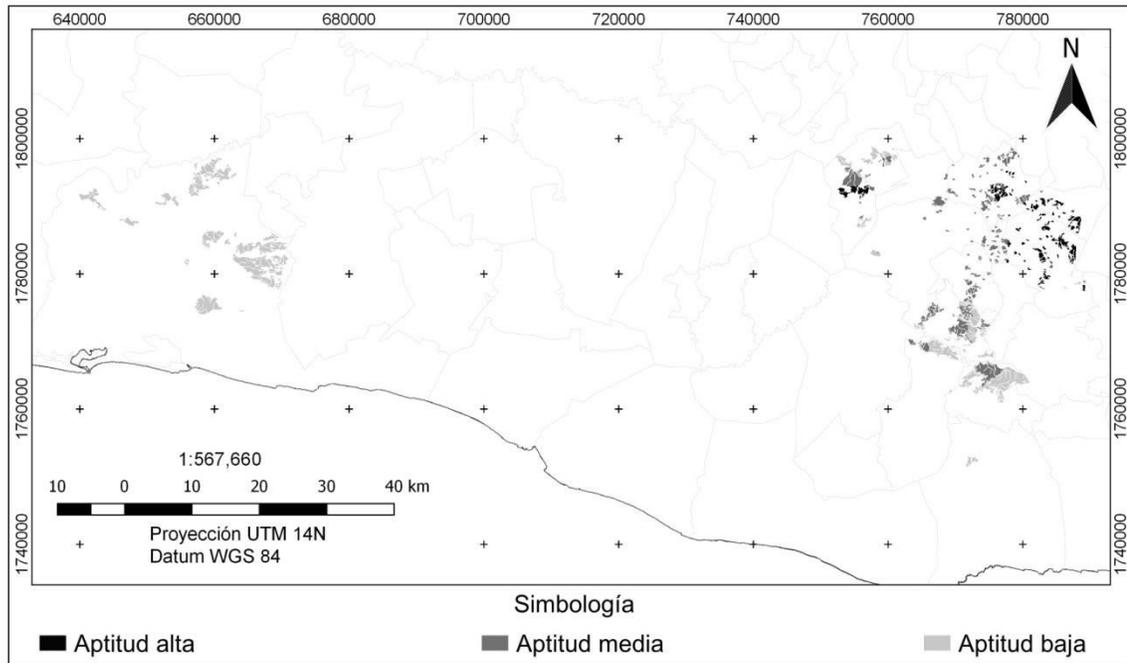
Anexo 5. Áreas potenciales para *Pinus leiophylla* Schl. & Cham.



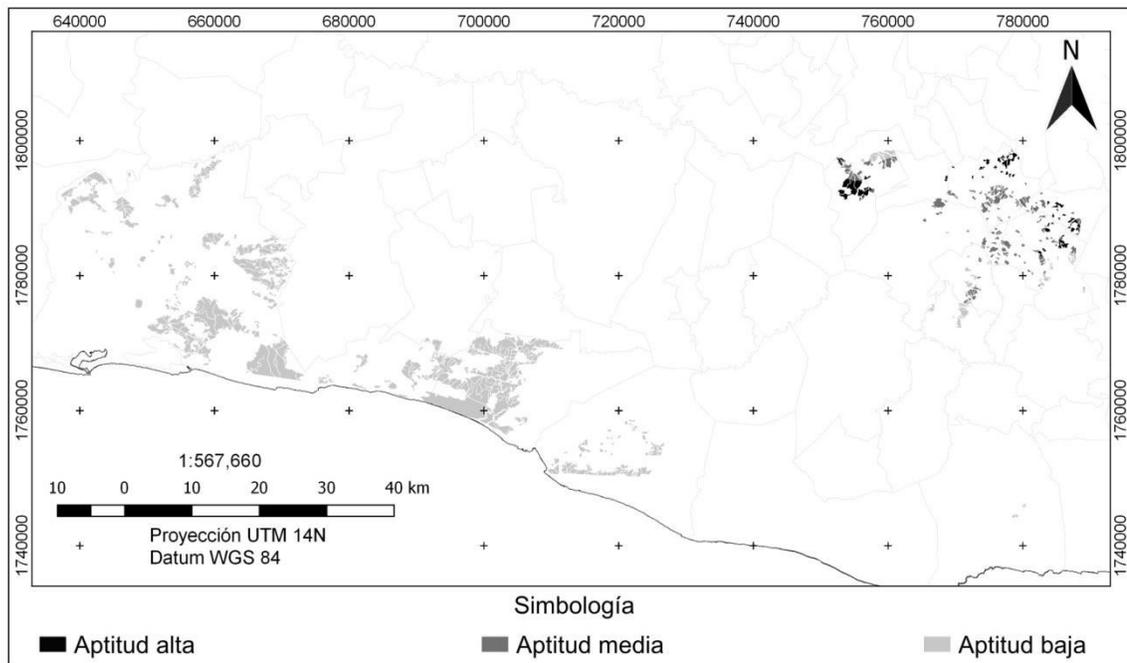
Anexo 6. Áreas potenciales para *Pinus douglasiana* Martínez.



Anexo 7. Áreas potenciales para *Pinus ayacahuite* Ehrenb.



Anexo 8. Áreas potenciales para *Pinus pseudostrobus* Lindl.



Anexo 9. Áreas potenciales para *Pinus patula* Schl. et Cham.

