



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS
NATURALES**

**IDENTIFICACIÓN DE ZONAS APTAS PARA LA
RECUPERACIÓN DEL BOSQUE DE ALTA MONTAÑA
DEL ESTADO DE MÉXICO**

**TESIS
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN
CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS
NATURALES**

**PRESENTA:
JOSÉ LUIS LÓPEZ GARCÍA**



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS
NATURALES**

**IDENTIFICACIÓN DE ZONAS APTAS PARA LA
RECUPERACIÓN DEL BOSQUE DE ALTA MONTAÑA
DEL ESTADO DE MÉXICO**

**TESIS
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN
CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS
NATURALES**

**PRESENTA:
JOSÉ LUIS LÓPEZ GARCÍA**

**COMITÉ DE TUTORES
DIRECTOR DE TESIS
DR. ANGEL ROLANDO ENDARA AGRAMONT**

**TUTORES ADJUNTOS
Ph. D. SERGIO FRANCO MAASS
DR. JESÚS SORIA RUIZ**

El Cerrillo Piedras Blancas; Toluca, Estado de México. Agosto 2013

DEDICATORIAS

A Dios padre por permitirme vivir y concluir mis estudios de maestría.

A mi madre "Juanita" que siempre estuvo cuando más la necesite, gracias mamá por levantarme de las muchas veces que caí y, sé que siempre estarás para seguir guiándome en mi camino.

A mi hermano Andrés López García porque a pesar de estar separados, cuando nos vemos siempre me das tus palabras de aliento y me dices que estas orgulloso de mi, gracias hermanito.

Aunque ya no están conmigo, sé que desde el cielo me cuidan y dan fortalezas para enfrentar las adversidades que me presenta la vida, gracias abuelita y papá.

A todas las personas que aún con mis tropiezos confiaron en mí.

RESUMEN

Se analizó el grado de aptitud ambiental y calidad de sitio para la recuperación del bosque de alta montaña del Estado de México, así como las características físico-químicas del suelo. Para el primer caso, se consideraron variables ambientales empleadas en otros trabajos de investigación. Sin embargo los rangos de aptitud fueron establecidos a partir de la revisión de literatura, así como a partir de una serie de puntos ubicados en el bosque de *Pinus hartwegii* Lindley. Para el segundo caso, se instalaron 42 parcelas de muestreo en las que se levantó información de calidad de sitio e información dasonómica. En ambos casos, los datos se analizaron a partir de técnicas de Evaluación Multicriterio y Sistemas de Información Geográfica; mientras que las características físico-químicas del suelo fueron evaluadas a partir de 21 sitios de muestreo: 7 en bosque denso, 7 en semidenso y 7 en fragmentado. Los resultados muestran que ambientalmente, las mejores zonas para la recuperación del bosque de alta montaña del Estado de México se localizan en el Parque Nacional Nevado de Toluca y en el Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan, ya que del total de la superficie con un nivel muy alto de adecuación (4235 ha), el 23% corresponde al primer caso y el 20% al segundo. En contra parte, la Sierra de las Cruces solo ocupa el 16%, y es también en esta zona donde se localizan las áreas con el nivel muy bajo de aptitud, ya que de 4672 ha, el 30% se localiza en esta zona. Estas condiciones ambientales pueden estar favoreciendo que las especies forestales se estén adaptando a condiciones cada vez más extremas, principalmente en las zonas de mayor altitud. Por otra parte, las mejores condiciones de calidad de sitio se localizan en la Sierra de las Cruces, sin embargo, estadísticamente las tres zonas no mostraron diferencias significativas ($p > 0.05$), lo que hace pensar que la calidad de sitio no sólo depende de las condiciones dasonómicas sino también de las condiciones ambientales. Ante esto, analizando la relación entre el grado de aptitud ambiental y el de calidad de sitio, se identificó que sólo un sitio cumple con un grado alto de aptitud para la recuperación del bosque y se localiza en la Sierra de las Cruces, cabe recalcar que se trata de una relación a nivel de punto de muestreo. Por otra parte, el análisis físico-químico del suelo de la alta montaña muestra que la mayor disponibilidad de nutrientes en el suelo se presenta en los primeros 30 cm de profundidad. Esta diferencia en la concentración de nutrientes puede estar influenciada por la densidad del bosque y los incendios forestales, ya que los resultados muestran que a mayor número de incendios y mayor densidad del bosque, la disponibilidad de materia orgánica, fósforo, Ca^{2+} , N y pH se incrementa, y el resto de los nutrientes del suelo mostró un comportamiento heterogéneo. Por esto, el estudio sugiere que para la recuperación de los bosques de la alta montaña se consideren principalmente variables de calidad de sitio y que estas sean interrelacionadas con las variables ambientales para así lograr un mayor grado de éxito de la regeneración o reforestación en el Estado.

SUMMARY

We analyzed the degree of environmental suitability and quality for the recovery of a high mountain forest in the State of Mexico, as well as the physical and chemical characteristics of the soil. For the first case, we considered environmental variables used in other research projects, however, the degrees of fitness were established from a literature review and a series of points located in the *Pinus hartwegii* Lindley forest. For the second case, 42 sample plots were settled, in which site quality and dasonomic information were measured. In both cases, data were analyzed with multicriteria evaluation techniques and geographic information systems, while the physico-chemical properties of soil were generated from 21 sampling sites: 7 in dense, 7 in semi-dense and 7 in fragmented forests. The results show that environmentally, the best areas for forest recovery in the high mountains of the State of Mexico are located in the National Parks of Nevado de Toluca and of Izta-Popo Zoquiapan, since from the total surface with a very high suitability (4,235 ha), 23% corresponds to the first case and 20% to the second. In counterpart, the Sierra de las Cruces mountain chain occupies only 16% of the area with very high suitability, and it is also there where the areas with low adequacy are located, since from the total 4672 ha, 30% are located in this area. These environmental conditions may be favoring that forest species are adapting to increasingly extreme conditions, especially in the higher elevations. Moreover, the best site quality areas are located in the Sierra de las Cruces, though statistically, the three areas showed no significant differences ($p > 0.05$), which suggests that the site quality not only depends on dasonomic conditions but also on the environmental conditions. Given this, analyzing the relationship between the degree of site quality and environmental suitability, it was found that only one site presents a high degree of suitability for forest recovery and is located in the Sierra de las Cruces, it should be emphasized that it is a relationship at the sampling point level. Moreover, the physico-chemical analysis of the soil of the high mountain shows that the highest availability of nutrients in the soil is present in the first 30 cm of depth, this difference in nutrient concentrations may be influenced by forest density and forest fires, because the results show that the greater the number of fires and the higher the forest density, the availability of organic matter, phosphorus, Ca^{2+} , N and pH increase. The remaining analyzed soil nutrients showed a heterogeneous behavior. Therefore, the study suggests that in order to promote the recovery of high mountain forests, mainly the site quality variables should be considered and that these are interrelated with the environmental variables in order to achieve a greater degree of regeneration or reforestation success in the State.

AGRADECIMIENTOS

Al **CONACYT** por la beca otorgada para realizar los estudios de Maestría en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales.

Al **Instituto de Ciencias Agropecuaria y Rurales (ICAR-AUEMEX)**, que fue mi lugar de aprendizaje profesional y personal. Así como al proyecto AUEM 3063/2011) por el apoyo económico brindado para el desarrollo de trabajo de campo.

Al **Dr. Angel Rolando Endara Agromont** por brindarme las herramientas necesarias para el desarrollo de mi trabajo, así como por el apoyo proporcionado para realizar el trabajo de campo.

Al **Dr. Sergio Franco Maass** y **Dr. Jesús Soria Ruiz** por las observaciones pertinentes realizadas a mi trabajo de investigación.

Al **Dr. Gabino Nava Bernal** por el apoyo brindado en los momentos difíciles de la maestría.

Al equipo de trabajo de campo de la alta montaña: **Mario Fermin Castañeda Rojas, Noé Antonio Aguirre González, Marlen Fabiola García Martínez, Martha Cedillo Alonso, José Enrique Figueroa Morales, Jorge Luis Hernández Escobar.**

A las laboratoristas del ICAR: **María de Lourdes Maya Salazar y Laura Edith Martínez Contreras** por las asesorías en el análisis físico-químico de suelos.

A las instituciones **PROBOSQUE, CONAFOR, CONANP** por la información proporcionada.

A los ejidatarios del Municipio de Xalatlaco por permitirme realizar los muestreos en sus bosques.

Agradezco a todos mis maestros de la maestría que me transmitieron nuevos conocimientos para enriquecer mi trabajo, así como a todos los amigos que me brindaron una palabra de aliento para seguir adelante y no darme por vencido...gracias amigos.

Al excelente grupo de investigadores, pero sobre todo con una excelente calidad humana, a los amigos del Instituto Boliviano de Investigación Forestal (IBIF-Bolivia): **Marisol Toledo, Daniel Espinosa, Natally Azcarruz, Juan Carlos Licon, Alfredo, Sandra, Estela María Quintero, Marlene Soriano, Limber Saldaña.**

A los Ing. **Edgar Ponce, Ing. Milton Milán Brosovich** por el apoyo brindado para desarrollar parte de la metodología de Índice de Sitio.

CONTENIDO

DEDICATORIAS	I
RESUMEN.....	II
ABSTRACT	III
AGRADECIMIENTOS.....	IV
CONTENIDO.....	V
LISTA DE CUADROS	VI
LISTA DE DIAGRAMAS	VII
LISTA DE FIGURAS	VIII
1. INTRODUCCION GENERAL.....	1
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
2.1 Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Evaluación Multicriterio (EMC).....	4
2.1.1 <i>Sistemas de Información Geográfica</i>	6
2.1.2 <i>Evaluación Multicriterio (EMC)</i>	7
2.2 Conceptualización de calidad de sitio (CS).....	11
2.2.1 <i>Métodos para evaluar calidad de sitio</i>	13
2.2.2 <i>Factores ambientales para la localización de especies forestales</i>	13
2.2.3 <i>Factores dasonómicos para identificar zonas de recuperación</i>	18
3. JUSTIFICACIÓN.....	22
4. OBJETIVOS.....	23
4.1 Objetivos específicos.....	23
5. HIPÓTESIS	23
6. MATERIALES Y MÉTODOS	24
6.1 Zona de estudio	24
6.2 Ocupación del suelo 2012	25
6.3 Identificación de variables.....	26
6.3.1 <i>Grado de aptitud ambiental</i>	26
6.3.1.1 <i>Obtención del grado de aptitud ambiental</i>	29
6.3.2 <i>Variables de calidad de sitio</i>	30
6.3.2.1 <i>Medición de factores externos</i>	31
6.3.2.2 <i>Medición de factores internos</i>	34
6.3.3 <i>Análisis de la información</i>	36
6.3.3.1 <i>Regeneración</i>	37

6.3.3.2	<i>Semilleros</i>	37
6.3.3.3	<i>Suelos</i>	37
6.3.3.4	<i>Vegetación</i>	38
6.3.3.5	<i>Índice de sitio (IS)</i>	39
6.3.3.5	<i>Luminosidad</i>	39
6.3.3.4	<i>Obtención del grado de aptitud de calidad de sitio</i>	40
6.4	Identificación de zonas óptimas para la recuperación del bosque de alta montaña del Estado de México	41
7.	RESULTADOS	42
7.1	Análisis del grado de aptitud ambiental para la recuperación del Bosque de alta montaña del Estado de México	43
7.2	Análisis de la calidad de sitio para la recuperación del bosque de alta montaña del Estado de México.....	61
7.3	Zona aptas para la recuperación del bosque de alta montaña del Estado de México	79
7.4	Características físico-químicas del suelo en el Bosque de Alta montaña del Estado de México	81
8.	CONCLUSIONES GENERALES	88
9.	RECOMENDACIONES	90
10.	LITERATURA CITADA	91

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Matriz de evaluación	9
Cuadro 2. Ponderación de factores.....	10
Cuadro 3. Clasificación de la regeneración por clase y tamaño.....	18
Cuadro 4. Matriz de confusión de las clases validadas	26
Cuadro 5. Rangos óptimos de distribución del bosque de alta montaña del Estado de México	27
Cuadro 6. Valores reclasificados para obtener la mejor orientación.....	28
Cuadro 7. Valores reclasificados para obtener el suelo óptimo	29
Cuadro 8. Peso de los factores ambientales	29
Cuadro 9. Tipo y grado de erosión.....	32
Cuadro 10. Clasificación de la regeneración.....	34
Cuadro 11. Grado aptitud (Regeneración)	37
Cuadro 12. Grado aptitud (semilleros).....	37
Cuadro 13. Grado de aptitud del factor profundidad del suelo	38
Cuadro 14. Grado aptitud de espesor de la materia orgánica.....	38
Cuadro 15. Datos estadísticos	38
Cuadro 16. Grado aptitud de altura de pastizal	39
Cuadro 17. Estadísticos obtenidos	39
Cuadro 18. Rangos de aptitud del factor IS	39
Cuadro 19. Rangos de aptitud del factor luminosidad en el área de estudio.....	40
Cuadro 20. Ponderación de factores de calidad de sitio.....	40
Cuadro 21. Valores estadísticos de los análisis de físico-químicos de los suelos de la alta montaña del Estado de México	81
Cuadro 22. Relación de la densidad del bosque, incendios y análisis de suelos (0-30cm) de la alta montaña	82

LISTA DE DIAGRAMAS

Diagrama 1. Estrategia aplicada para la revisión documental	4
Diagrama 2. Sistema de integración entre EMC-SIG	7
Diagrama 3. Esquema metodológico desarrollado.....	24

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. <i>Pinus hartwegii</i> Lindley Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan, 2012	1
Figura 2. Problemas en el bosque de alta montaña del Estado de México	2
Figura 3. Regeneración en el Municipio de Xalatlaco y (b) producción de plantas en la alta montaña, Tlalmanalco, México.....	3
Figura 4. Escala de medida	10
Figura 5. Distribución de los bosques de alta montaña del Estado de México	25
Figura 7. Normalización del factor altitud-temperatura.....	27
Figura 8. Normalización de la pendiente	28
Figura 9. Normalización de la temperatura y precipitación mediante la función borrosa	28
Figura 10. Material de campo	30
Figura 11. Muestreo de calidad de sitio y suelo.....	31
Figura 12. Zonas de muestreo de suelos dentro del área de estudio	32
Figura 13. Muestreo de suelo	33
Figura 14. Análisis físico-químico de suelos en el laboratorio de suelos	33
Figura 15. Medición de altura del pastizal, Parque Nacional Izta – Popo Zoquiapan	34
Figura 16. Regeneración natural en la Sierra de las Cruces, Xalatlaco, 2012	35
Figura 17. Muestreo “datos de índice de sitio”	36
Figura 18. Dispersión de los datos edad-altura en el bosque de alta montaña.....	36
Figura 19. Relación grado de aptitud ambiental/calidad de sitio	79
Figura 20. Estructura vertical.....	80
Figura 21. Estructura horizontal.....	80
Figura 22. Relación densidad del bosque/Ca	83
Figura 23. Relación densidad del bosque/Mg.....	84
Figura 24. Relación densidad del bosque/densidad aparente.....	85
Figura 25. Relación No. Incendios-Contenido de fósforo (p) con la densidad del bosque.....	85
Figura 26. % de N a diferente profundidad.....	86
Figura 27. Relación profundidad del suelo/pH	87

1. INTRODUCCION GENERAL

En México los bosques representan el 24% de la superficie con vegetación terrestre (INEGI, 2005), sin embargo a causa de la deforestación se pierden 319, 000 ha/año (Velázquez *et al.*, 2002). Para el caso del Estado de México, la superficie forestal reportada por Nava y colaboradores (2009) es de 645, 145 ha, de las cuales 246, 400 ha están cubiertas por bosques de pino. No obstante (PROBOSQUE, 2010) reporta que cerca de 225 mil ha están perturbadas.

En el Estado de México, la ubicación de los recursos forestales presentan variaciones altitudinales desde los 300 msnm a los 5500 msnm, donde la mayor parte del territorio es montañoso, siendo el volcán Popocatepetl (5220 msnm) Iztacíhuatl (5220), Nevado de Toluca (4660 msnm) y Sierra de las Cruces los más representativos de la alta montaña. Los rangos altitudinales y climáticos han permitido una variedad de especies de bosque de pino, siendo *Pinus hartwegii* Lindley (Figura 1) el de mayor superficie con 79, 129 ha (Nava *et al.*, 2009).



Figura 1. *Pinus hartwegii* Lindley Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan, 2012

Sin embargo, esta amplia variedad de recursos forestales ha sufrido una serie de problemas ambientales ocasionados principalmente por la cercanía a la Zona Metropolitana de la Ciudad de México y el Valle de Toluca; además de actividades agropecuarias. PROBOSQUE (2010) menciona que 61, 154 ha de los bosques y selvas del Estado de México se encuentran fragmentados y tiene una tasa de deforestación de 12 850 ha/año, ocasionando que cerca de 225 974 ha de suelos forestales se encuentren perturbados.

Además de ello existen otros problemas como la tala clandestina, incendios forestales y plagas. Para el Estado de México se reportaron aproximadamente 1, 409 incendios principalmente

derivados de actividades agropecuarias. Por otra parte, la presencia de plagas y enfermedades: insectos descortezadores (*Dendroctonus* spp), defoliadores (*Evita hyalinaria blandaria*, *Malacosoma incurvum* var. *aztecum*) y plantas parásitas como muérdagos (*Psittacanthus* spp y *Arceuthobium* spp) afectan anualmente una superficie aproximada de 300 hectáreas (PROBOSQUE, 2010).

De forma local, Bobbink y colaboradores (2003) estiman una reducción del 13.2% en la densidad de los bosques del Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan (PNIPZ). Por su parte Franco y colaboradores (2006) mencionan que el Parque Nacional Nevado de Toluca (PNNT) presenta 8, 000 ha de su cobertura forestal con problemas de fragmentación; así mismo, Cedillo (2012) estimó que 6, 003 ha del bosque de pino (*Pinus hartwegii* Lindley) se encuentran afectados por muérdago enano (*Arceuthobium globosum* y *A. vaginatum*) (Figura 2).



Figura 2. Problemas en el bosque de alta montaña del Estado de México: (a) Agricultura, (b) sobrepastoreo, (c) incendios, (d) *Dendroctonus adjunctus*, (e) *Arceuthobium vaginatum*, (f) *Arceuthobium globosum*

Una de las formas para identificar zonas degradadas, es mediante los cambios de ocupación y uso del suelo, así como el comportamiento de la estructura (distribución diamétrica, estrato arbóreo), regeneración (abundancia de plántulas, brinzales y latizales), y sanidad (Endara, 2010), también factores ambientales (altitud, pendiente, orientación, temperatura, precipitación, densidad del bosque, tipo de suelo) y de calidad de sitio (regeneración, zonas semilleras, profundidad efectiva del suelo, índice de sitio, luminosidad, profundidad del mantillo, altura del

pastizal). Todos estos factores interrelacionados permitirán establecer zonas de regeneración o reforestación (Figura 3).



Figura 3. (a) Regeneración en el Municipio de Xalatlaco y (b) producción de plantas en la alta montaña, Tlalmanalco, México

En este trabajo de investigación, se estudia la ocupación del suelo, grado de aptitud ambiental y calidad de sitio de los bosques de alta montaña del Estado de México; así como las condiciones físico-químicas del suelo. Estos indicadores permitirán identificar las mejores zonas para la recuperación del bosque, mismos que pueden ser considerados en los programas de pago por servicios ambientales y campañas de reforestación, orientados hacia la conservación de los bosques del Sistema Volcánico Transversal.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

Para determinar los sitios que requieren una recuperación del bosque de alta montaña del Estado de México, el presente estudio hace énfasis en los siguientes análisis: ocupación del suelo, grado de aptitud ambiental, análisis de calidad de sitio y análisis físico-químico de suelos y su relación con la densidad del bosque e incendios forestales

El bosque de alta montaña es un ecosistema forestal que se desarrolla por encima de los 3500 msnm. Dicha caracterización responde al establecimiento de poblaciones de *Pinus hartwegii* Lindley, como única especie arbórea capaz de adaptarse a condiciones extremas de frío y altitud (Endara *et al.*, 2013), se encuentra representado por tres estratos arbóreos principalmente, donde se pueden localizar zonas con 336 individuos/ha con diámetro a la altura de pecho (DAP) > 2.5cm (Endara *et al.*, 2012), tienen una altura de 8 a 25 m, con un diámetro normal de 40 a 70 cm (Eguiluz, 1978).

Basado en este tipo de estudio, el presente trabajo parte de la relación existente entre la geografía y la ecología, la cual se sustenta; por una parte, en la distribución geográfica de las especies forestales del bosque de alta montaña y por otra en las características ambientales y dasonómicas que deben cumplir los sitios con potencialidad para la recuperación del bosque.

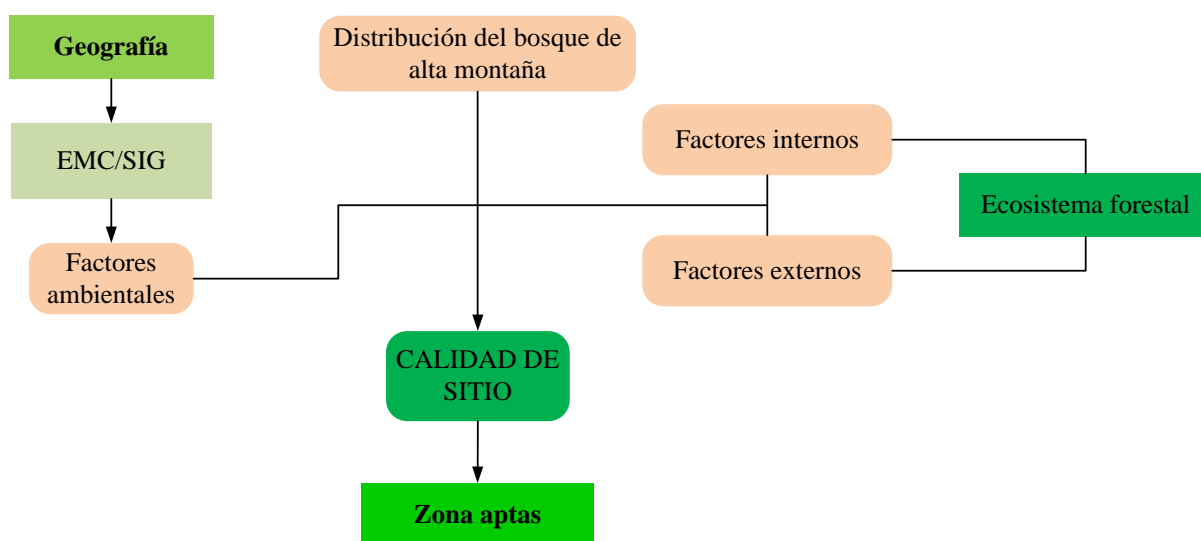


Diagrama 1. Estrategia aplicada para la revisión documental

2.1 Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Evaluación Multicriterio (EMC)

En la actualidad el empleo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) ha permitido mayor grado de análisis en la toma de decisiones y como binomio con las técnicas de Evaluación Multicriterio (EMC), los trabajos tienen mayor certidumbre de localizar las mejores zonas para establecer una actividad que ofrezca su máximo potencial. En este sentido, el empleo de SIG-EMC permitió identificar sitios con aptitud ambiental y de calidad de sitio.

La interrelación de factores ambientales como la precipitación y temperatura son indispensables para lograr el éxito de una reforestación (FAO, 1959). Ravelo y Abril (2007), interrelacionan factores edáficos, topográficos, climáticos, bióticos, sociales, productividad del bosque, variables dasonómicas y sanidad para establecer plantaciones forestales. Otra evidencia del empleo SIG-EMC con variables ambientales, es el trabajo de Mena y Montecinos (1996), plantean modelos de capacidad de acogida para plantaciones forestales de *Pinus radiata* y cultivos extensivos (praderas naturales), para ello, utilizaron el proceso de jerarquías analíticas, tomando como factores principales a la altitud, pendiente y orientación.

Ruiz (2002), Palomino y Parra (2003) mencionan que los criterios para la elección de las especies a reforestar, se debe considerar el interés de la población para reforestar, crecimientos (Altura-DAP), disponibilidad del material, resistencia a plagas, propiedades físico-químicas del suelo, erosión, zonas degradadas, demanda y valor del producto final.

Sobre los problemas de la efectividad de la reforestación en México, Arriaga *et al.* (1994) mencionan que es muy común que la reforestación se lleve a cabo en terrenos completamente degradados por uso agrícola, sobrepastoreo o una explotación forestal sin manejo eficiente. Además, las zonas a reforestar no presentan las condiciones adecuadas para la reforestación con especies leñosas, ya que por lo general suelen tener escasa capa de suelo, los suelos deben tener por lo menos 30 cm de profundidad, una buena textura; además de la presencia de estrato herbáceo y selección de la especie adecuada.

Aunque en el presente trabajo no se incluyen variables sociales y económicas, Alcalá *et al.* (2009) aplicaron una metodología para generar y evaluar criterios e indicadores ambientales con apoyo de la comunidad dentro del área de influencia del Programa Bosque Modelo de Chihuahua. Las técnicas empleadas fueron basadas en dos tipos: encuestas y consensos de nueve criterios (social, servicios básicos, biodiversidad, desechos, recurso agua, recurso forestal, uso de suelo y degradación) y 92 indicadores generados por diversas organizaciones de carácter internacional, nacional, regional y local.

Por su parte Vela *et al.* (2004) en un estudio para la Sierra de Guadalupe en el Distrito Federal (D.F) consideran variables como: posición fisiográfica, forma del terreno, pendiente, altitud, microclima, drenaje externo, uso de suelo, prácticas de manejo, material parental, pedregosidad y erosión. Como caso particular del suelo, se tomaron características físicas como la profundidad efectiva, resistencia a penetración, compactación, color, densidad aparente, porosidad, textura, estructura, estabilidad estructural, permeabilidad, relación suelo/agua, drenaje interno, oscilación freática y facilidad de laboreo; así como características químicas: pH, nitrógeno total, materia orgánica, relación Ca/Mg, saturación de aluminio, presencia de elementos pesados y cantidad de

salinidad y alcalinidad (Siebe, 1996; Kendrick y McFadden, 1996; Etchevers, 1998; Ortíz *et al.*, 2000) citado por Vela *et al.* (2004).

Para el Estado de México, se han realizado trabajos que integran el binomio SIG-EMC (Pineda *et al.*, 2012), y concretamente en zonas de alta montaña, Regil (2008) identificó sitios óptimos para establecer especies forestales, la identificación de estas zonas se basó en los requerimientos de las especies, los cuales se encuentran disponibles en información preestablecida.

El presente trabajo aborda la interrelación de factores ambientales y su representación espacial esto mediante el empleo de SIG-EMC, lo cual es indispensable para el modelado, análisis y representación espacial, ya que ofrece una serie de ventajas, entre las que destacan (Franco *et al.*, 2003).

- Ahorra tiempo en los procesos manuales;
- maneja grandes volúmenes de información y permite su almacenamiento en formatos compactos;
- presenta una gran versatilidad y flexibilidad en los espacios de salida;
- permite la generación y manejo de base de datos espaciales y su correspondiente representación cartográfica;
- los datos pueden ser actualizados;
- la información geográfica puede ser extraída y manipulada en forma simultánea e interrelacionada;
- permite la integración de colecta de datos, análisis espacial y toma de decisiones dentro de un contexto común;
- provee mapas actualizados;
- permite una mejor organización del trabajo cartográfico;
- permite la reducción en costos en la producción de cartografía y
- permite el manejo de algunas herramientas para la manipulación cartográfica.

2.1.1 Sistemas de Información Geográfica

Los SIG son un conjunto de dispositivos para el almacenamiento, análisis, y utilización de las numerosas informaciones del territorio disponibles en formato digital. Están constituidos por un conjunto de componentes informáticos (físicos y lógicos), medios y procedimientos preparados para facilitar la obtención, gestión, manipulación, análisis, modelado, representación y salida de

datos sobre el territorio. Además, se emplean para preparar y elaborar tareas de planificación, ordenación del territorio y para la gestión de una multitud de cuestiones con una referencia espacial. Las aplicaciones van desde infraestructura, catastro, transporte de mercancías y pasajeros, zonas urbanas, cuestiones agropecuarias, forestales, entre otras (Bosque, 2000).

Las operaciones realizadas a partir del uso de herramientas SIG pueden ser innumerables, Bosque (2000), los resume en funciones de entrada, salida/representación gráfica y cartográfica, y analíticas.

2.1.2 Evaluación Multicriterio (EMC)

La EMC puede ser definida como un conjunto de técnicas orientadas a asistir en los procesos de toma de decisiones basados en una serie de alternativas y objetivos en conflicto (Munier, 2004).

Este conjunto de alternativas de basan en los principios de la teoría de decisión, la cual puede orientarse en dos direcciones: la positiva (descriptiva) y la normativa (prescriptiva). La primera se basa en una serie de construcciones lógicas para explicar y predecir el comportamiento de los fenómenos; mientras el enfoque normativo o prescriptivo “comienza por definir la racionalidad de los agentes económicos en base a una serie de supuestos justificables (Romero, 1993 citado por Gómez y Barredo (2005).

Para lograr una visión de los componentes y las relaciones EMC-SIG, Gómez y Barredo (2005) lo explican a través del siguiente diagrama:

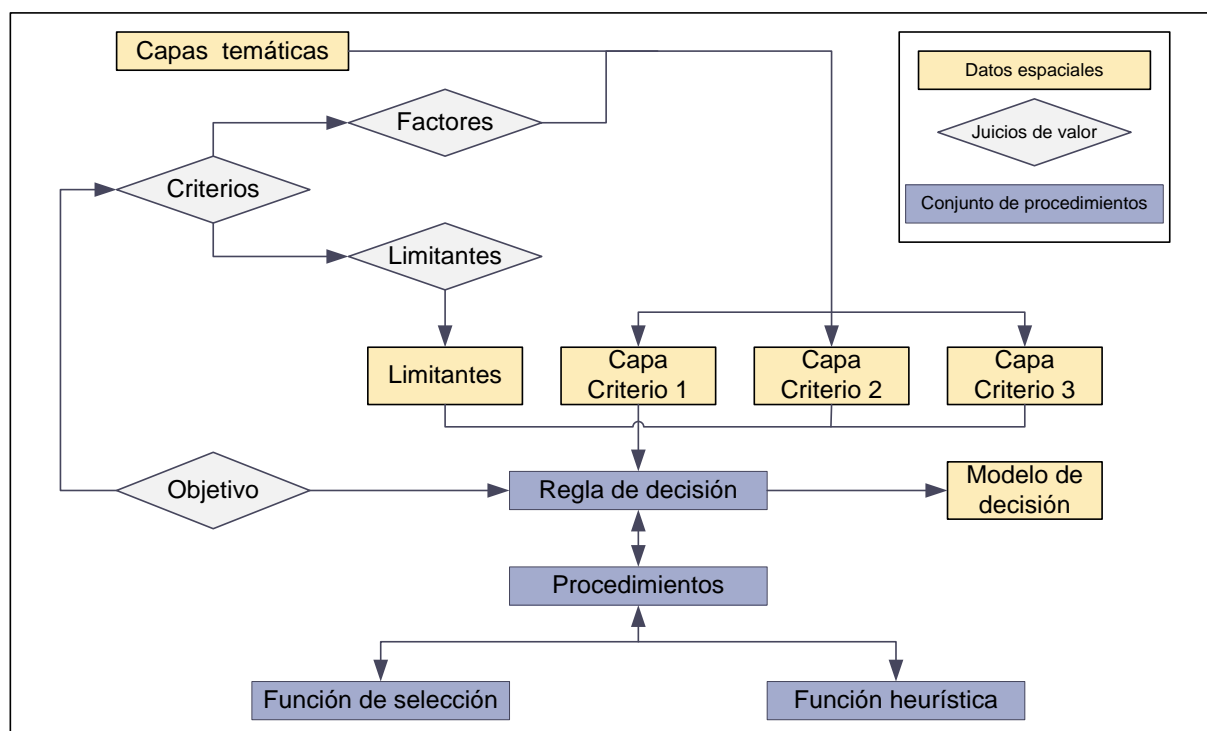


Diagrama 2. Sistema de integración entre EMC-SIG

a. Objetivos y alternativas

El objetivo se puede entender como una función a desarrollar, indica la estructuración de la regla de decisión sobre un elemento determinado (Eastman *et al.*, 1993) citado por Gómez y Barredo (2005).

En el entorno SIG, las alternativas están representadas por objetos o unidades espaciales, celdas en el modelo raster, o bien, polígonos, líneas o puntos en modelo vectorial.

b. Los criterios

La EMC esta integrada por una serie de factores y limitantes, un “criterio es cierta base para la toma de una decisión, ésta puede ser medida y evaluada. Es la evidencia sobre la cual se basa una decisión” (Eastman *et al.*, 1993) citado por Gómez y Barredo (2005).

Los criterios pueden ser de dos tipos: factores y limitantes. “Un factor es un criterio que realza o detracta la capacidad de asentamiento de una alternativa específica para la actividad en consideración, éste por lo tanto debe ser medido en una escala continua” (Eastman *et al.*, 1993) citado por Gómez y Barredo (2005), en cambio, el criterio de tipo limitante restringe la disponibilidad de algunas alternativas en función de la actividad evaluada.

c. Regla de decisión

Se trata de la selección entre alternativas (o posibilidades de elección), las cuales pueden representar diferentes cursos de acción, hipótesis, localizaciones u otros conjuntos de elementos, puede ser considerada como el procedimiento a través del cual se obtiene una evaluación particular, pudiendo también comparar a través de ella, distintas evaluaciones con el fin de variar alguno de sus aspectos en caso de que sea necesario. Esta decisión puede ser desde muy simple (cuando se elige a partir de un solo criterio) o tan complejo (involucra toda una serie de criterios), en este caso es cuando se aplica la EMC.

La regla de decisión puede realizarse a *priori* en dos tipos de procedimientos: la función de selección y la selección heurística. En el primer caso, las comparaciones las realiza mediante un medio matemático, mientras que el segundo sigue un procedimiento para seleccionar solo algunas alternativas del conjunto global de estas (Gómez y Barredo, 2005).

d. La evaluación

Puede desglosarse en una serie de objetivos específicos que indiquen cómo actúa la regla de decisión, así mismo, los criterios son estructurados en buena medida en función de los objetivos propuestos.

Para poder evaluar al conjunto de criterios y alternativas en la EMC se aplica una matriz de criterios (j) definidos en la columna principal, y las alternativas (i) en la fila principal. Los valores internos de esta matriz son llamados puntuaciones de criterios (X_{ij}), estos representan el valor o nivel de adecuación que ha obtenido cada alternativa en función de cada criterio (Cuadro 1).

Cuadro 1. Matriz de evaluación

		Alternativas (i)				
		1	2	3	4	i
Criterios (j)	1	Puntuaciones de criterios (X_{ij})				
	2					
	3					
	J					
	J					

e. Normalización

Un dato importante, previo al proceso de ponderación, es la normalización de factores, los cuales se pueden encontrar en distinta escala de medida, por lo que resulta recomendable se normalicen en una misma escala comparable (Santos y Borderías, 2002).

Dentro de los métodos más conocidos para la estandarización o normalización, se encuentra la estandarización por el valor máximo, mediante amplitud total o recorrido, aunque también es posible utilizar métodos de normalización, aquellos que se basan en funciones de pertenencia borrosa, sobre todo cuando se trata de factores continuos.

La lógica difusa es una técnica que ayuda a la interpretación más exacta de la información imprecisa, incompleta o incierta, implícita en la opinión de los expertos en la toma de decisiones. La teoría matemática de la lógica difusa fue propuesta por Zadeh en 1965, y se basa en la existencia de diferentes grados de pertenencia entre falso y verdadero (deseado y no deseado; apto y no apto). Es decir, utiliza valores como “moderado”, “bajo”, “alto”, entre otros (Prakash, 2003) citado por Pineda *et al.* (2012).

Las funciones borrosas se caracterizan por un grado de pertenencia difusa (llamado también *posibilidad*) que oscila de 0.0 a 1.0 o en escala de byte (0-255), indicando un aumento continuo de la no pertenencia a la pertenencia completa que pueden ser funciones borrosas de tipo sigmoideal y lineal.

f. Ponderación de factores

Un elemento importante en la EMC, es la ponderación de los criterios; es decir la importancia y asignación de pesos. Barba-Romero y Pomerol (1997) hacen una revisión sobre los diversos métodos de ponderación (objetivos y subjetivos), entre los cuales se encuentran: a) el método de la entropía; b) métodos de asignación directa; c) métodos de iegenpesos o d) métodos de

comparación de alternativas. A excepción del primero, el resto son subjetivos, es decir se basan en toma de decisiones humanas, y su puntuación puede depender de la manera en que se presenten los criterios, de determinadas connotaciones semánticas de las valoraciones, del momento en el que se realice la asignación.

El presente trabajo se enfoca a uno de los más utilizados (Regil, 2008 López, 2011; Pineda *et al.*, 2012;), se encuentra dentro del conjunto de métodos de asignación de pesos basados en el cálculo de autovector dominante (eigenvector) de una matriz de comparaciones binarias de los factores (Barba-Romero y Pomerol, 1997).

El método de comparación por pares de Saaty parte de establecer una matriz cuadrada en la cual el número de filas y columnas está definido por el número de factores a ponderar, así se establece una matriz de comparación entre pares de factores, comparando la importancia de uno sobre cada uno (a_{ij}), posteriormente se determina el eigenvector principal, el cual establece los pesos (w_j) y el eigenvalor que proporciona una medida cuantitativa de la consistencia de los juicios de valor entre pares de factores (Saaty, 1980).

El procedimiento se inicia con una matriz de comparación por pares, en este caso de factores (Gómez y Barredo, 2005; Munier, 2004). En esta matriz se asigna en cada celda un juicio de valor (a_{ij}), que representan la importancia relativa de cada factor (columna principal) con otros (fila principal), donde los valores son recíprocos, y solo los valores en la diagonal (valor 1) denotan igualdad en la comparación de cada factor consigo mismo (Cuadro 2).

Cuadro 2. Ponderación de factores

Factores	A	B	C	D
A				
B				
C			a_{cb}	
D				

La escala de medida establecida para la asignación de los juicios de valor (a_{ij}), es una escala de tipo continuo (ratios o razón) que va desde un valor mínimo de 1/9 hasta 9 que es el valor máximo (Saaty, 1980) citado por (Gómez y Barredo 2005; Munier, 2004 y) tal y como aparece en la figura 4.

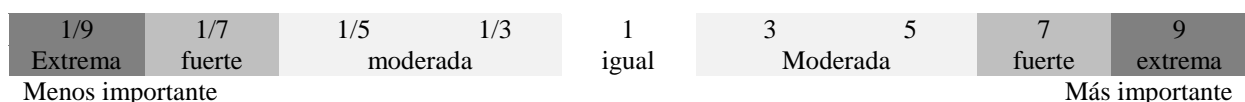


Figura 4. Escala de medida

Una vez que se establecen los juicios de valor en la matriz de comparación por pares, el procedimiento establece el cálculo del eigenvector principal de la matriz, el cual representa el orden de prioridad de lo factores, mientras que el eigenvalor máximo (λ_{MAX}) de la matriz es una medida de consistencia de los juicios.

El procedimiento para obtener los pesos de los factores según Munier (1994), se realiza de la siguiente manera:

- a) se multiplican todos los valores de la fila entre ellos;

$$\prod_{i=1}^n n_{\text{pci}} \quad \text{Donde:} \quad (1)$$

C: Criterio

N: número de criterios

- b) se obtiene la raízⁿ (número de factores);
c) cada resultado es dividido entre la sumatoria de raíz.

Para saber si los juicios de valor y asignación de pesos es correcta, se valoran a partir de una medida operativa de la consistencia, que permite valorar la relación de los criterios entre sí determinando su coherencia y pertinencia. Uno puede esperar una cierta incertidumbre o subjetividad (Gómez y Barredo, 2005).

El método calcula un valor denominado razón de consistencia (*Consistency ratio, c.r.*). El cual está diseñado de tal manera que si es menor a 0.10 entonces la proporción indica un nivel razonable de coherencia en la comparación por pares; no obstante, si el valor es mayor o igual a 0.10, entonces el valor indica juicios inconsistentes.

2.2 Conceptualización de calidad de sitio (CS)

La importancia de conocer la calidad del sitio es porque cada espacio cuenta con sus propias características de clima, fisiografía, suelo y vegetación, que le permiten proveer determinados factores de crecimiento al árbol. Por otra parte cada especie se desempeña mejor que otras en un sector determinado dentro de los gradientes ambientales (Finegan, 1994) citado por Revolorio (1996).

La calidad de sitio puede ser definida como la capacidad potencial de un sitio de sostener una producción de madera de una especie o tipo de bosque, en particular, de una interrelación de factores topográficos, edáficos, bióticos y climáticos (Stiff *et al.*, 1991; Salas, 1974; Clutter *et al.*, 1983). Esta definición se acopla más a la productividad del bosque; sin embargo para el caso, se orientara hacia la conservación del mismo, enfatizando principalmente en la reforestación y regeneración natural. Es por ello que se buscó interrelacionar las variables ambientales y dasonómicas para definir las zonas la óptima en calidad de sitio.

Revolorio (1996) considera que cada espacio cuenta con sus propias características de clima, fisiografía y vegetación, que le permiten prever determinados factores de crecimiento al árbol; además de que cada especie desempeña mejor su altura total (AT) y diámetro.

Por otra parte, Estrada (1997) menciona que para establecer sitios de regeneración natural es conveniente conocer una serie de factores internos (constitución fisiológica del árbol y calidad del sitio) y externos (factores ambientales) que benefician o limitan el establecimiento de la regeneración.

Para poder obtener la calidad de sitio de un rodal o parcela se debe calcular el índice de sitio, Murillo (2000) contempla cinco índices de calidad que permiten estimar e interpretar certeramente el nivel de calidad y el potencial productivo de una plantación forestal:

- a) *índice general* se debe aplicar preferentemente en plantaciones jóvenes y/o no raleadas, los resultados de este índice serán 1.0 a 4.0. Los valores cercanos a 1 corresponderán a plantaciones de la más alta calidad y valores ≥ 3 corresponden a valores de muy mala calidad y probablemente no rentables.
- b) *Índice de calidad de cosecha*. Este se aplica cuando se desea comparar la calidad de una plantación con otra o entre plantaciones de diferente edad, manejo o especie. Este se basa únicamente en el número de individuos por hectárea.
- c) *Índice de calidad máxima*. Considera el número de individuos por hectárea para obtener el potencial maderero que tiene una plantación
- d) *Índice de calidad de productividad*. Además de obtener los índices de calidad antes mencionado este índice permite obtener el potencial volumétrico de un sitio.

Ivancich y colaboradores (2011) mencionan que de acuerdo al empleo de ecuaciones no forzadas y forzadas se sobrestiman y subestiman valores en las clases de sitio a partir del uso de la altura, así como la edad base mayor a la media. Por su parte Jerez y colaboradores (2011) al comparar el desempeño entre modelos mixtos con modelos de efectos fijos, en las variantes lineal y no lineal, identificaron que los modelos de efectos mixtos mostraron menores errores estándar que los parámetros estimados, mientras que los modelos lineales mixtos fueron mejores, pues arrojaron valores más negativos que el modelo lineal de efectos fijos.

Atárola y colaboradores (2001) mediante el empleo del modelo de Schumacher y el índice de sitio, clasificaron las plantaciones forestales de *Dedrelinga catenaeformis* Durke (tornillo) en tres clases de sitios: alta (1) a los sitios con una altura dominante mayor a 28.04 m, media (2) sitios con alturas de 22.32 a 28.04 m, y baja (3) a sitios con altura dominante menor a 22.32 m.

Debido a los deterioros forestales que presentan los bosques y la escasa producción de plantas para reforestar con especies endémicas, Márquez y colaboradores (2009) mencionan que la ubicación de árboles semilleros es de vital importancia para la recuperación de bosques; sin embargo para identificar zonas semilleras se debe considerar la especie adecuada, la mejor procedencia productiva, evidencia de regeneración, presencia de conos, área con luminosidad

mayor al 40%, y de ser posible evitar rodales con árboles bifurcados, torcidos, dañados o enfermos. (Willan, R. 1984; Márquez *et al.*, 2009).

2.2.1 Métodos para evaluar calidad de sitio

Existe una diversidad de métodos para determinar la calidad de sitio, el método aplicado va depender de la elección a la cual se adecua al sitio. (Carmean 1975; Spurr y Burtonv, 1982; Clutter *et al.*, 1983) señalan que los métodos para estimar la calidad de sitio se dividen en directos e indirectos. Los primeros se basan en mediciones periódicas del volumen producido en las diferentes etapas de desarrollo, en la estimación por medio de registros históricos en parcelas permanentes, con base a datos de volumen y altura del rodal, mientras que los segundos se basan en las condiciones ambientales, vegetación y la relación entre especies del dosel superior.

Una de las propuestas y bajo la cual se desarrolló la presente investigación es el planteado por (Vincent,1975 y Hägglund, 1981), en función de las variables a evaluar, agrupan los diferentes métodos, en dos grandes grupos:

- Evaluación en base a variables del rodal o características de la vegetación (volumen, altura, edad de los árboles, plantas indicadoras);
- evaluación en base a factores del medio ambiente (topografía, suelo, clima).

Dado que el presente trabajo tiene un enfoque de conservación y no comercial, se aplicó el método basado en técnicas de EMC y SIG de variables ambientales (topografía, clima y suelos); además de análisis de regeneración, semilleros, vegetación, e índice de sitio como indicadores para identificar los sitios con la mejor calidad para establecer zonas de recuperación.

2.2.2 Factores ambientales para la localización de especies forestales

Las marcadas diferencias genéticas en el crecimiento y otras características se expresan generalmente cuando las poblaciones están creciendo en latitudes o altitudes sustancialmente diferentes a la de sus hábitats originales. La asociación entre las especies arbóreas y los animales puede jugar un papel importante en el desarrollo de algunos caracteres. Además, la supervivencia y el crecimiento se encuentran estrechamente relacionados a la eficiencia en el aprovechamiento de la estación de crecimiento. En sus hábitats, las especies pueden anticipar las fluctuaciones de las estaciones respondiendo genéticamente a los factores más confiables del cambiante medio ambiente (Spurr y Burtonv, 1982).

Una de las variables que se toma en cuenta en el crecimiento es la latitud; así, las poblaciones alejadas de la zona ecuatorial tienen estaciones de crecimiento que difieren en su duración y cada una se adapta a diferentes fotoperiodos, de acuerdo con las condiciones del lugar y en particular,

al fotoperiodo otoñal que es importante porque regula el comienzo del estado latente. Con respecto a la altitud, las poblaciones en mayores altitudes necesariamente cesan su crecimiento más temprano que aquellas que se encuentran en las zonas bajas debido a la temprana aparición de heladas (Spurr y Burtonv, 1982).

Entre los factores ambientales, o factores del hábitat o del sitio, el clima y el suelo son los que juegan un papel importante en la estructura y características de la vegetación. Al mismo el tipo de clima y la vegetación son decisivos en el desarrollo del suelo y las especies que soporta. Es necesario no olvidar que el suelo también es influido por otros factores, principalmente por la composición de la roca madre y la topografía, en tanto que la vegetación de un área está también naturalmente influida por la composición florística y por la topografía (Spurr y Burtonv, 1982).

Los factores pueden ser utilizados de forma aislada o en combinación como un índice de la calidad de la localización. Incluidos en éstos, se encuentran todos los factores climáticos y edáficos. Muchos factores de la localización quedan desinflados para su uso como índice debido a la dificultad o gasto para obtener la información (Spurr y Burtonv, 1982).

2.2.2.1 Factores climáticos

Los factores climáticos de localización son generalmente útiles para proveer un índice amplio de productividad entre las regiones forestales adyacentes o entre distintas altitudes dentro de una región geográfica. Se encuentra más estrechamente asociados que los factores del suelo a las diferencias genéticas sobre un rango geográfico y de altitud de las especies, siendo responsables en gran medida de estas diferencias. En particular, los datos de temperatura y precipitación pueden ser utilizados para comparar el crecimiento forestal en vastas regiones geográficas. Dentro de una región climática, el crecimiento varía, dependiendo de las condiciones del suelo y topografía. Los factores del suelo, por lo tanto, son aptos para tener un uso particular en los estudios locales de calidad de la localización forestal.

Debido a que la suma total de los factores climáticos, topográficos, suelo y bióticos, definen la porción de la localización del ecosistema forestal; los que más se usan como índice de la productividad forestal, serán los que presenten mayor correlación. En términos generales, los factores climáticos permiten delinear las diferencias regionales o de altitud, y los factores topográficos y suelo para distinguir las diferencias particulares de las localizaciones (Spurr y Burtonv, 1982).

La precipitación pluvial y la temperatura son en cierta medida las que determinan el tipo de clima del sitio, por lo tanto, es necesario que las áreas que se consideren similares, en los aspectos antes mencionados, presenten además patrones de lluvia y temperatura parecidos

(Arriaga *et al.*, 1994). Para el caso del bosques de pino (López, 2011) cita que las mejores zonas de temperatura para la reforestación es de 14°C; para el caso del factor precipitación, la más adecuada es de 1100 mm, aunque también se desarrollan en zonas donde las lluvias van de los 700 mm a los 1500 mm

2.2.2.2 Factores topográficos

Los factores geomorfológicos o de modelado que influyen sobre la vegetación comprenden aspectos como la pendiente del terreno (ángulo que forma la superficie topográfica con la horizontal), orientación de las vertientes (posición que ocupan respecto al norte geográfico) y el relieve (diferencia de altura entre las partes altas y los fondos de los valles adyacentes) (Strahler, 1982). Factores como la pendiente, orientación de vertientes y el relieve influyen en la sequedad o humedad de una serie de hábitats vegetales determinados de una región. En este sentido, el tipo de geoforma va definir los grados de humedad de los suelos forestales. Por ejemplo, en los interfluvios y crestas montañosas, el suelo tiende a estar seco debido al rápido drenaje existente, y a la exposición a la luz del sol y viento. Por el contrario, en los valles tienden a ser húmedos debido a la capacidad de almacenaje de agua.

- a) Pendientes. De acuerdo con la guía del medio físico del Ministerio del Medio Ambiente de España (CEOTMA, 1991), las mejores pendientes para las actividades forestales se ubican por encima del 25%, sin embargo esto va a depender del tipo de especie a reforestar, así como toda una serie de variables ambientales.
- b) Orientación. Es la posición de una zona respecto del norte geográfico, modifica directamente la radiación y, a partir de ella, el resto de las características climáticas. Es importante porque con base a la cantidad de luz recibida será mejor el crecimiento de cierta especie. De acuerdo con las fichas técnicas de CONAFOR, la vertiente más adecuada para el bosque de pino es la norte, aunque no se debe descartar la noreste y noroeste (López, 2011). Para Arriaga y colaboradores (1996), la exposición del terreno es también un factor importante de analizar, pues determina en cierto modo la humedad que conserve el sitio. Partiendo del hecho que en nuestro país, por su latitud, las laderas que estén orientadas hacia el sur, reciben mayor cantidad de radiación solar que las que están orientadas hacia el norte, lo cual determina que estas últimas sean más húmedas y por lo general presentan vegetación más exuberante que la de exposición sur que son más “secas”.
- c) Altitud. Se trata de una variable determinada para localizar las zonas de mayor adaptación de las especies vegetales ya que, como es bien sabido, cada especie tiene unos umbrales altitudinales óptimos, los cuales hay que tener en cuenta para evitar el fracaso de la repoblación o como cita (Arriaga *et al.*, 1994), la altitud parecida o que se encuentren en un

rango de variación que no provoque un cambio en el tipo de vegetación, es decir, si al modificarse la altitud manteniendo los demás parámetros iguales, se registra el establecimiento de otro tipo de vegetación, como puede ser el paso de la selva baja caducifolia al bosque de encino, entonces los sitios no tienen similaridad ambiental.

2.2.2.3 Factores edáficos

Bockheim (1991) define a la potencialidad del suelo forestal como una parte de la superficie terrestre que sirve como un medio para el sostenimiento de la vegetación forestal, por otra parte define a la fertilidad del suelo forestal como la capacidad de éste para suministrar elementos nutritivos para el crecimiento de las plantas. El suelo es uno de los factores que determina la calidad de un sitio, siendo un importante componente del ecosistema forestal que influye en el crecimiento del bosque, calidad de la madera y resistencia a especies invasoras.

Por otra parte Arriaga y colaboradores (1994) mencionan que el tipo de suelo se debe considerar su origen (roca que formó al suelo). Además, considerarse 30 cm de profundidad efectiva del suelo como la más recomendable para soportar especies forestales.

Por otra parte, también se considera el grado de erosión, el cual se define como el proceso de sustracción o desgaste del relieve del suelo intacto por acción de procesos geológicos exógenos como las corrientes superficiales de agua o hielo glaciar, el viento o la acción de los seres vivos. Para el caso de erosión en suelos forestales, ésta se presenta cuando es retirada parcial o totalmente la cubierta vegetal, originando la pérdida de nutrientes del suelo y semillas forestales.

Uso del suelo. Es uno de los elementos del medio más determinante, por lo que se tratará como una variable clave en este trabajo. En este sentido, las mejores zonas para el repoblamiento forestal serán aquellas localizadas en bosque semidenso y fragmentado.

Una vez que se tengan ubicados los sitios con similaridad ambiental, es preciso determinar si la vegetación que sustentan es original (primaria) y si esta se debe a las condiciones ambientales que imperan en el sitio, o si por el contrario ha sido propiciada por el uso y manejo recibido (agricultura, ganadería, extracción forestal, etc.), que la convertirá en vegetación secundaria (Arriaga *et al.*, 1994).

Para la elección de especies se debe dar preferencia de aquellas que se establecen en los sitios que presentan vegetación secundaria arbórea y arbustiva, ya que es aquí donde se encuentran principalmente las más resistentes, de más rápido crecimiento y que se adaptan a condiciones ambientales extremas. No es recomendable escoger especies de la vegetación primaria para reforestar, sitios muy degradados, porque generalmente, además de ser de crecimiento lento, requieren de condiciones ambientales estables y con menores limitaciones (Arriaga *et al.*, 1994).

Las limitantes para recuperar zonas forestales, se pueden definir como aquellas donde no es posible la designación del espacio idóneo. Las restricciones limitan la posibilidad de considerar alguna alternativa, excluyéndola de forma definitiva. Comúnmente se genera una capa binaria (0 ó 1) para este tipo de criterio. Estas limitantes son las siguientes: cuerpos de agua, áreas urbanas, y presencia del estrato arbóreo.

2.2.2.4 Otros factores

a. Luminosidad

Otro de los factores que influye en la regeneración y reforestación, es la luminosidad, la cual se vuelve indispensable para la fotosíntesis, influye además en la transpiración de las plantas, en la morfología, floración y otras funciones ligadas a la duración del período diario de iluminación (Centeno y Ruíz, 1993) citado por Estrada (1997). Ante ello, (Willan, 1984; Márquez *et al.*, 2009) mencionan que la luminosidad adecuada en zonas con aptitud para regeneración debe ser de al menos el 40%, por su parte Rojo *et al.*, (1994) citado por Alejano (2003) menciona que la radiación óptima se encuentra del 35% al 100% para la regeneración en *Pinus sylvestris*.

b. Profundidad del mantillo

Otro indicador importante, es el efecto del mantillo orgánico, es decir, a mayor profundidad, mayor densidad de regeneración. El mantillo orgánico puede jugar un papel predominante en: 1) microclima, 2) lavado de semillas y 3) indicador de disturbio; además de amortiguar cambios en la temperatura, reducir evapotranspiración y suministrar continuamente nitrógeno y fósforo al suelo mineral (Estrada, 1997), sin embargo no todas las especies forestales requieren este comportamiento. Centeno y Ruiz (1993) citado por Estrada (1997), mencionan que un espesor de mantillo > a 5 cm disminuye la densidad de regeneración, esto se debe principalmente a que actúa como barrera para el depósito de la semilla sobre la capa de suelo. Pero en el caso de especies de pino, el espesor puede variar de los 0.67 a 9.67 cm (Dones *et al.*, 1997).

c. Altura del pasto

Aunque existen pocos trabajos que relacionen la densidad de árboles y la altura del pastizal, la importancia de este último está en la facilidad de la semilla para llegar a la capa de suelo, por un lado, pastos bajos son indicadores de un suelo compactado y por otro, alturas superiores impiden que la semilla llegue a la capa de suelo. La presencia de pasto y otros arbustos genera una competencia entre los individuos y otras plantas; además de que influye en las distintas fases del proceso de regeneración: en la germinación, supervivencia y posterior desarrollo de la regeneración (Alejano, 2003).

2.2.3 Factores dasonómicos para identificar zonas de recuperación

Aunque se ha utilizado al índice como indicador de calidad de sitio, en el presente trabajo además de éste, se ha incluido la regeneración natural, árboles semilleros, profundidad efectiva del suelo, altura del pasto y espesor de la materia orgánica.

2.2.3.1 Regeneración

La dinámica de regeneración es el proceso por la cual se incorporan nuevos individuos a la población reproductora, mientras otras van desapareciendo como consecuencia de la mortalidad natural o inducida. Este proceso implica la producción, dispersión, germinación de semillas y el establecimiento de la repoblación natural en un suelo forestal (Harper, 1977).

Dos factores que están íntimamente relacionados en la densidad de la regeneración, es la exposición a la luz y la presencia de árboles semilleros. Para el caso de los bosques templados, requieren de grandes claros para su desarrollo.

Contemplando la regeneración como variable medible, es necesario optar por algún tipo de clasificación, en base a diámetro y altura. Para tal efecto, los términos de plántulas, brinzales, latizales y fustales son los más utilizados en manejo forestal, sobre todo cuando se trata de sitios temporales o permanentes de muestreo (Endara, 2010), para ello, se recomienda aplicar las siguientes clasificaciones (Cuadro 3).

Cuadro 3. Clasificación de la regeneración por clase y tamaño

Fredericksen y Mostacedo (2000)		Valdez (2002)	
Clase	Tamaño	Clase	Tamaño
Plántula	< 30 cm altura	Plántula	< 30 cm altura
Brinzal	≥ 0.3 < 1.5 m de altura	Brinzal	≥ 0.3 < 1.5 m de altura
Latizal bajo	≥ 1.5 m altura < 5 cm DAP	Latizal	≥ 1.5 m altura < 2.5 cm DAP
Latizal alto	≥ 5 < 10 cm DAP		
Fustal	≥ 10 < 20 cm DAP	Fustal	≥ 2.5 DAP

Entendiéndose por estructura forestal como la abundancia y dispersión espacial de árboles de distinto tamaño y/o edad (Veblen, 1992), la cual puede ser estudiada por separado en estructura horizontal y vertical. Se define estructura horizontal como la distribución espacial de individuos en una determinada área, mismo que permite conocer la cantidad de árboles por clase diamétrica (Siteo y Riveiro, 1995). Mientras que la estructura vertical es la distribución de biomasa a lo largo del perfil vertical del ecosistema, relacionada directamente con la altura de los árboles (Louman *et al.*, 2001). Esto permite identificar los estratos más representativos del bosque.

2.2.3.2 Semilleros

Para el caso de zonas semilleras, Márquez (2009) menciona que una fuente semillera es aquella que ha sido al menos una selección fenotípica relacionada con las características de producción

forestal requeridas en una región y cuenta con un soporte de información geográfica y biológica para su manejo y distribución.

Las fuentes semilleras pueden clasificarse:

- 1) árboles seleccionados, que son aquellos elegidos en rodales naturales o plantaciones de acuerdo a criterios preestablecidos;
- 2) rodal semillero, definido como un rodal natural o plantación completa donde la mayoría de los individuos presentan una apariencia fenotípica satisfactoria para la producción;
- 3) área semilleras, es un rodal natural donde se han eliminado los individuos que presentan características fenotípicas poco satisfactorias para la producción forestal, y los árboles restantes se ubican con espaciamiento suficiente para estimular la producción de semillas;
- 4) huerto semillero, es una plantación establecida a partir de árboles seleccionados que tiene la finalidad de producir semillas para abastecer los programas de plantación de una región determinada.

Otro de los elementos a considerar en los factores internos, y propiamente muy utilizado para evaluar la calidad de sitio, o calificar relativamente la calidad de un sitio, es mediante el índice de sitio.

2.2.3.3 *Índice sitio (IS)*

El IS se define como la altura que alcanzan los árboles dominantes a una cierta edad base (Monserud, 1987; Ortega y Montero 1988; Stiff *et al.*, 1991; Brosovich, 1998). Aunque, el índice de sitio tiene algunas limitaciones como: la altura, es sólo uno de los componentes del volumen, no es sinónimo de productividad en volumen, provee poca información acerca de las relaciones ecológicas que suelen influenciar en la productividad alcanzada (Curtis, 1964).

Para determinar el índice de sitio, se ha empleado la altura dominante, que es definida como el promedio de los 100 árboles de mayor diámetro por hectárea (Alder, 1980). Por su parte Vincent (1975) argumenta que los árboles de mayor diámetro no son necesariamente los más altos ni los más representativos, pues el desarrollo del diámetro está más relacionado con los factores de micrositio o de la densidad. Para el caso del *P. hartwegii* Lindley, la densidad puede afectar la altura del árbol, es decir a mayor densidad, los árboles crecen menos debido a la competencia por la luminosidad.

Los métodos para la evaluación de calidad de sitio, basados en datos de la altura del rodal, involucran el uso de curvas de IS. Estas son una familia de patrones gráficos de desarrollo de la altura a una edad determinada (Salas, 1974; Clutter *et al.*, 1983). Para la construcción de estas curvas, existen dos formas: métodos gráficos (*anomórficas* y *polimórficas*) (Clutter *et al.*, 1983;

Zepeda y Rivero, 1984), métodos matemáticos (*métodos de la ecuación diferencial y método de la predicción del parámetro*).

Los métodos gráficos se refieren a la representación de la altura versus la edad sin la utilización de formulas o modelos (Ortega y Montero, 1998). Este proceso consiste en graficar los datos edad-altura y luego dibujar tres curvas a través de la dispersión de los datos: una curva delimitando el superior de los datos, otra el borde inferior y una tercera siguiendo la tendencia central (Alder, 1980).

Para determinar las curvas de los índices de sitio, es necesario, la edad base, ésta se fija generalmente con base a la longevidad de la especie estudiada, lo habitual es tomar la edad base próxima a la mitad del turno, al final del turno, o al finalizar el crecimiento en altura de la especie (Ortega y Montero, 1998; Stiff *et al.*, 1991), mencionan que la ventaja de usar la edad base a la edad de terminación del máximo crecimiento, tiene la ventaja de que a partir de este punto no se van a producir cambios en la posición de las curvas, en cambio, la edad próxima a la mitad del turno, tiene la ventaja de poder conocer la calidad de sitio en masas jóvenes y predecir las producciones finales.

La construcción de estas curvas pueden ser de tipo anamórfica, las cuales se caracterizan por presentar la misma forma, ya que son proporcionales y la pendiente de altura de una curva a cualquier edad guarda una relación constante entre ellas; mientras que las curvas polimórficas, son familias con pendiente variable, que generalmente no guardan una relación de paralelismo entre ellas y no son proporcionales, por no depender una de otras (Clutter *et al.*, 1983).

Para la construcción de las curvas anamórficas con el método de la curva guía, se ha empleado la ecuación de Schumacher (Ecuación 2), para generar la curva guía se ajusta a la base de datos. Por otra parte, cuando la edad (E) se hace igual a edad base (E_0), entonces la altura (H) será igual al índice de sitio (IS), tal y como se muestra:

$$S = \beta_0 e^{(-B_1 \frac{1}{E_1})} \quad (2)$$

Como β_0 es un parámetro dependiente del el sitio y $S =$ Altura a la edad base, se obtiene la siguiente ecuación:

$$H = S e^{-B_1(\frac{1}{E_1} - \frac{1}{E_0})} \quad (2.1)$$

Mediante la ecuación de Chapman-Richards (ecuación 3), el procedimiento es similar a la ecuación anterior:

$$S = \beta_0 \left[1 - e^{(-B_1 \cdot E_0) B_2} \right] \quad (3)$$

Con la siguiente ecuación se genera la familia de curvas anamórficas:

$$H = S \left[\frac{1 - e^{-B_1 E_1}}{1 - e^{-B_1 E_0}} \right] \quad (3.1)$$

3. JUSTIFICACIÓN

En la actualidad se intenta recuperar la densidad forestal a través de la reforestación, tomando como criterio principal cualquier espacio desprovisto de arbolado; sin embargo no todos los sitios cumplen con la calidad de sitio adecuada para el crecimiento óptimo del arbolado. Cabe aclarar que además considerar acciones de control de incendios forestales, sanidad, extracción, seguimiento de las plantaciones, etc, con la calidad de sitio óptima, se puede lograr el máximo potencial de crecimiento de las especies forestales.

La presente investigación consideró variables ambientales y de calidad de sitio (vegetación, propiedades físico-químicas del suelo y dasonómicas), las cuales permitieron ubicar sitios con las mejores condiciones para la recuperación del bosque, mismos que pueden ser considerados por las instituciones de gobierno y educativas, así como los habitantes de la zona de alta montaña para los planes de manejo y conservación de los recursos forestales.

Esta información permitirá redimensionar los criterios para la selección de sitios semilleros, regeneración y reforestación; además de ser una alternativa para la recuperación de la cobertura forestal sin necesidad de una inversión económica elevada, y sin correr el riesgo de la alta mortandad de los árboles reforestados en condiciones ambientales y dasonómicas no aptas.

4. OBJETIVOS

Identificar zonas aptas para la recuperación del bosque de alta montaña del Estado de México mediante variables ambientales y de calidad de sitio.

4.1 Objetivos específicos

- Caracterizar las variables ambientales y de calidad de sitio que influyen en el crecimiento del bosque de alta montaña.
- Analizar las interrelaciones de las variables ambientales y de calidad de sitio para definir zonas óptimas de recuperación del bosque de alta montaña.

5. HIPÓTESIS

El bosque de alta montaña presenta un deterioro a través de la fragmentación, lo que ha conducido a la búsqueda de alternativas para su recuperación. Por tanto se plantea que, mediante el análisis de la interrelación de variables ambientales y de calidad de sitio, es posible identificar sitios aptos para la recuperación de este ecosistema forestal.

6. MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo del presente trabajo de investigación, se aplicó el esquema metodológico del diagrama 3.

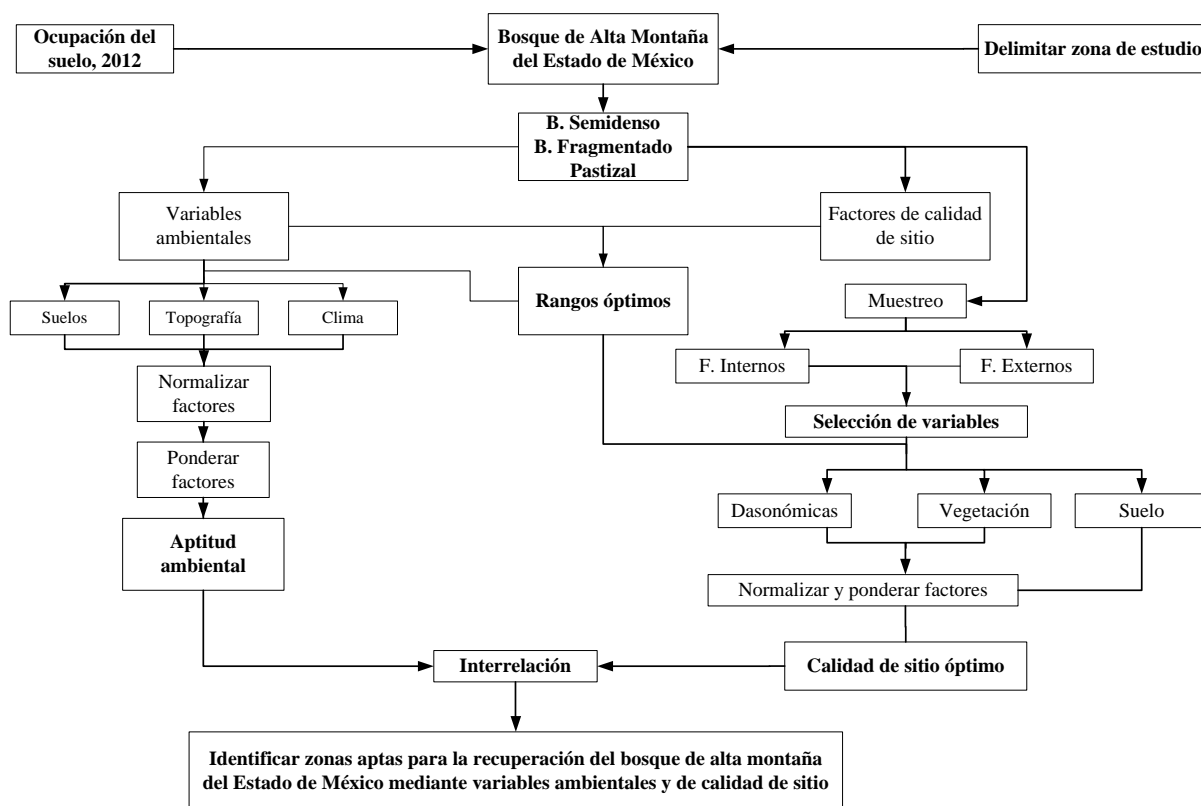


Diagrama 3. Esquema metodológico desarrollado

6.1 Zona de estudio

Para delimitar el bosque de alta montaña, se tomó como base el gradiente de altitud según Endara *et al.* (2013). La zona de alta montaña tiene una superficie de 45, 105 ha, de las cuales, el bosque de alta montaña tiene una superficie de 35, 806 ha, siendo *P. hartwegii* Lindley la especie de pino más representativa con 28, 319 ha. Se distribuyen principalmente en el PNNT, PNIPZ y Sierra de las Cruces (SC), además de pequeñas porciones en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala, Reserva de Biosfera “Mariposa Monarca” y Cerro Jocotitlán (Figura 5).

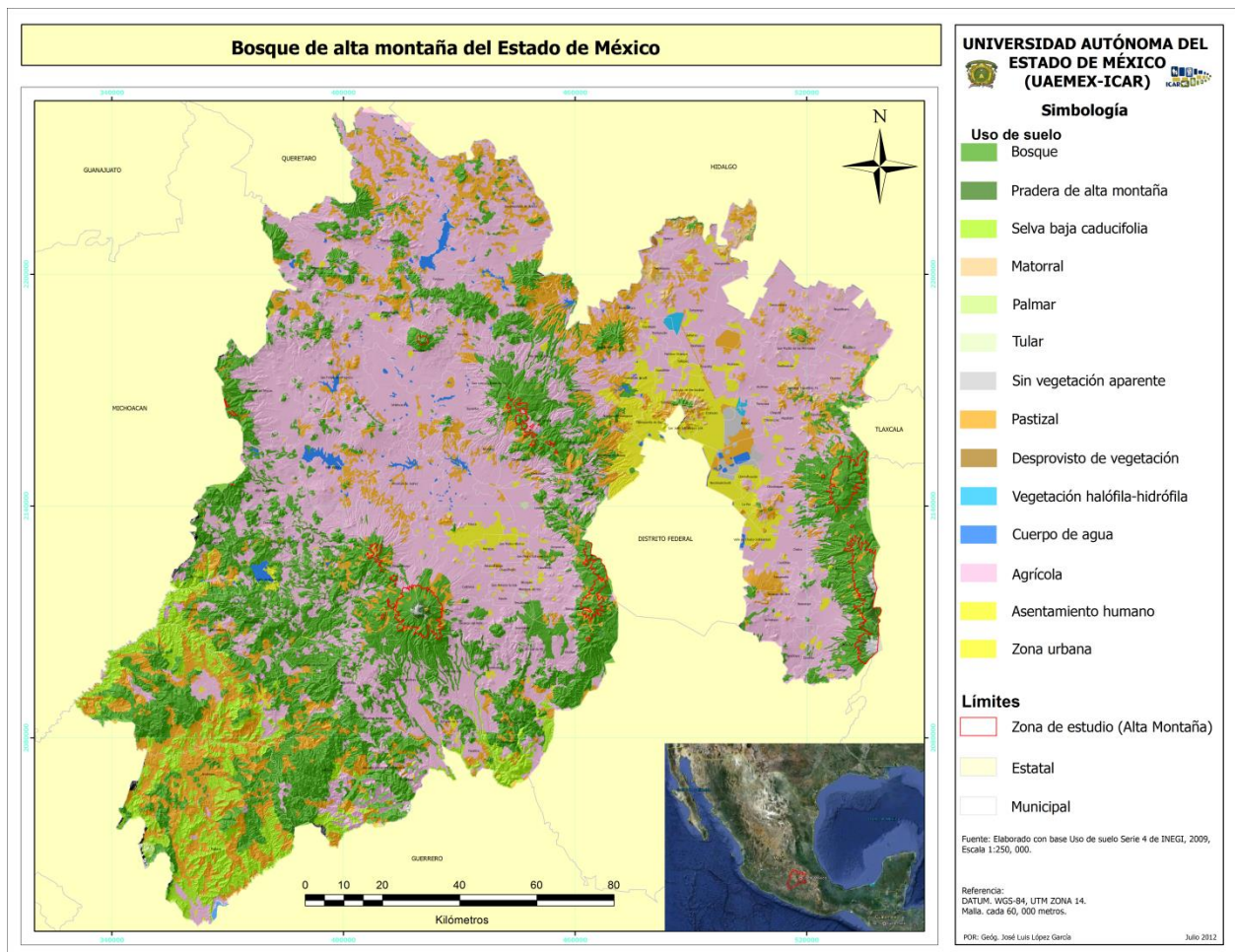


Figura 5. Distribución de los bosques de alta montaña del Estado de México

6.2 Ocupación del suelo 2012

Una vez definida la zona de estudio, se generó la cartografía de ocupación del suelo 2012, la cual fue utilizada para el análisis del grado de aptitud ambiental, densidad del bosque, así como para definir las zonas de muestreo de la calidad de sitio y suelos.

Con base a la información cartográfica de bosques y selvas del Estado de México (Nava *et al.*, 2010) y el uso de espacio-mapas (IGCEM, 2010) del sensor Spot-5 (Système Probatoire d'Observation de la Terre) en modo multi-espectral y pancromático, se generó la fusión de imágenes, el objetivo fue identificar a mayor nivel de detalle las cubiertas de interés en la alta montaña (Figura 6).



Figura 6. Fusión de imágenes Spot-5, 2010

Con base a los principios del análisis visual de imágenes de satélite empleados por Chuvieco (1996) y bajo un compuesto RGB 3-2-1, se discriminaron las siguientes cubiertas: cubiertas

forestales (*P. hartwegii* Lindley, *Pinus pseudostrobus*, *Pinus michoacana*, *Abies religiosa*, *Quercus laurina* Humb et Bonpl, *Alnus acuminata* Humboldt, Bonpland & Kunth), agrícola, pastizal, cuerpos de agua y áreas sin vegetación.

La cartografía fue validada con 255 puntos obtenidos con navegadores satelitales GPS y a través de la matriz de confusión (Cuadro 4), se tiene una confiabilidad del 90.2%, siendo las coberturas de *P. hartwegii* Lindley fragmentado y pastizal las cubiertas que presentaron mayor confusión.

Cuadro 4. Matriz de confusión de las clases validadas

Ocupación del suelo, 2012	Verificación puntos GPS, 2012									Total	Tasa coincidencia
	ard	arshm	a	p	phd	phsm	phfg	sv	sd		
ard	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	100
arshm	1	6	0	0	0	0	0	0	0	7	85.7
a	0	0	6	0	0	0	0	0	0	6	100
p	0	0	0	40	0	0	1	0	1	42	92.23
phd	0	0	0	1	71	1	0	0	0	73	97.26
phsm	0	0	0	1		46	0	0	0	47	97.87
phfg	0	0	0	9	1	4	26	0	0	40	65
sv	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	100
sd	0	0	0	2	0	0	0	0	6	8	75
total	2	6	6	53	72	51	27	1	7	225	

Ard: *Abies religiosa* (denso), arshm: *Abies religiosa* (semidenso), a: agrícola, p: pastizal, phd: *P. hartwegii* (denso), phsm: *P. hartwegii* (semidenso), phfg: *P. hartwegii* (fragmentado), sv: sin vegetación, sd: suelo desnudo.

6.3 Identificación de variables

La identificación y selección de variables se llevo en dos apartados, por un lado la generada a partir de la Base de Datos Cartográfica y por otro, la información referida a calidad de sitio. Para ello se establecieron los siguientes criterios:

- Espacios que reúnan las condiciones de topografía, clima y suelo para establecer zonas con aptitud para la recuperación del bosque de alta montaña del Estado de México.
- Sitios que cumplan con condiciones de calidad de sitio en: regeneración, producción de semilla, índice de sitio, profundidad efectiva del suelo, espesor de la materia orgánica, altura de pastizal y porcentaje de luminosidad.
- Las restricciones que pueden evitar la identificación de zonas óptimas fueron aquellas con un grado de erosión alto y muy alto, zonas afectadas por plagas o enfermedades forestales.

6.3.1 Grado de aptitud ambiental

Partiendo de la información cartográfica disponible, se seleccionaron las variables ambientales a considerar en la EMC. Cabe mencionar que la información fue homogeneizada y rasterizada de acuerdo a los requerimientos ambientales del bosque de alta montaña.

6.3.1.1 Rangos óptimos de distribución

Para establecer los rangos óptimos, se realizó un muestreo en 225 puntos en el bosque denso de *P. hartwegii* Lindley, estos fueron posteriormente interrelacionados con la cartografía de las variables físicas (topografía, clima y suelo) de la alta montaña.

Identificados y definidos los rangos de las variables físicas se reclasificaron de acuerdo a los datos mostrados en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Rangos óptimos de distribución del bosque de alta montaña del Estado de México				
Origen de datos	Factor	No apto	Sub-óptimo	óptimo
Generados a partir de MDE, INEGI 2000	Altitud (msnm)	< a 2900.0 > a 4100.1	2900.1 a 3509.9 3590.1 a 4100.0	3510.0 a 3590.0
	Pendiente °	< a 2.4 > a 22.1	2.5 a 4.9 12.1 a 22.0	5.0 a 12.0
	Orientación °	-	90.1 a 270.0	0.0 – 90.0 270.1 a 360
	Temperatura (°C)	< a 4.0 > a 9.1	4.1 a 4.9 8.1 a 9.0	5.0 a 8.0
(Cuervo <i>et al.</i> , 2011)	Precipitación (mm)	< a 900.0 >a 1260.0	900.0 a 999.9 1200.1 a 1260.0	1000.0 a 1200.0
INEGI, 2000	Tipo de suelo	Otros	Feozem, regosol y cambisol	Andosol
INEGI, 2009	Erosión	Extrema y no aplica	Leve-moderada	Suelo estable
Propia	Densidad del bosque	Otras cubiertas	Fragmentado-denso	Semidenso

6.3.1.2 Obtención de cartografía normalizada

Una vez establecidos los rangos con los requerimientos en altitud, pendiente, orientación, temperatura, precipitación, tipo de suelo, erosión y densidad del bosque, se normalizaron en el Software SIG Idrisi Selva, dependiendo del tipo de variable (cuantitativa o cualitativa) se aplicó una normalización borrosa con incremento monotónico o simétrico. Resultado de ello, fue una imagen raster en escala de bit (0-255 bits).

a. Altitud-temperatura

La normalización de estos dos factores se realizó mediante la función borrosa simétrica (Figura 7), y debido a la alta correlación entre estas dos variables (Pineda *et al.*, 2012), se aplicó un overlay para integrar un solo factor.

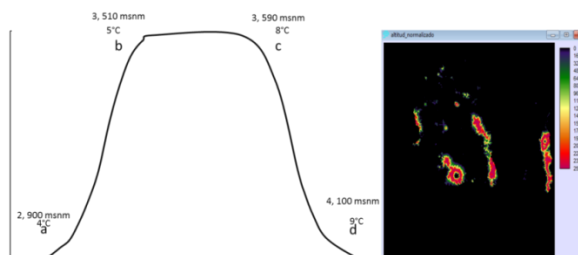


Figura 7. Normalización del factor altitud-temperatura

b. Pendiente

Se aplicó una normalización borrosa simétrica, donde el umbral óptimo fue establecido de los 5° a 12° (Figura 8).

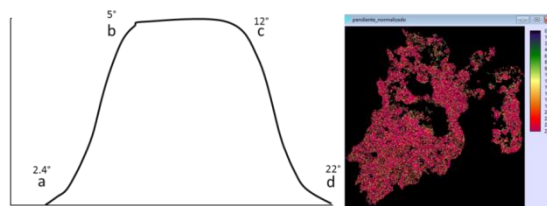


Figura 8. Normalización de la pendiente

c. Orientación

Para CONAFOR (2007), Pineda y colaboradores (2012) consideran que la zona N y NW son las más aptas para la adaptación del bosque, sin embargo de acuerdo al muestreo de puntos, se identificó que la zona NE también presenta condiciones para establecer zonas de recuperación.

Para normalizar este factor, primero se reclasificó de acuerdo a los valores mostrados en el cuadro 6. Posterior a ello, se aplicó una normalización con la función borrosa de tipo lineal con incremento monótono.

Cuadro 6. Valores reclasificados para obtener la mejor orientación

Exposición solar	Valores en grados	Valor reclasificado
Sur	180	2
Suroeste	180.1 a 270	2
Sureste	90.1 a 180	2
Oeste	270	2
Este	90	2
Noroeste	270.1 a 360	1
Noreste	0.1 a 89.9	1
Norte	0	1

d. Precipitación

De acuerdo a la información sobre los requerimientos óptimos para la adaptación del bosque, éste se distribuye en zonas donde la precipitación es de 1000 mm a 1200 mm. La normalización aplicada a este factor fue de tipo sigmoïdal borrosa (Figura 9).

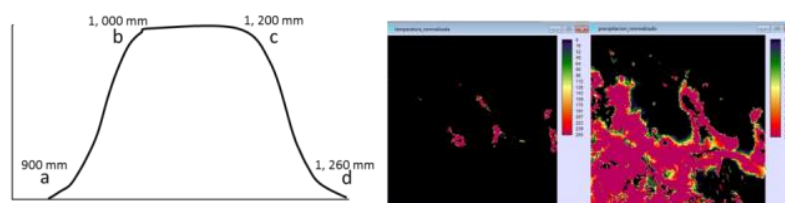


Figura 9. Normalización de la temperatura y precipitación mediante la función borrosa

e. Tipo de suelo

En el bosque de alta montaña del Estado de México predominan suelos de tipo andosol, feozem y cambisol (INEGI, 2000). Para (Eguiluz, 1978; CONAFOR, 2007 y Pineda *et al.*, 2012), coinciden que los suelos de tipo andosol son los más adecuados para el desarrollo de actividades forestales, debido a que son derivados de cenizas volcánicas.

Para normalizar este factor primero se reclasificó y posteriormente se ponderó de acuerdo a los pesos mostrados en el cuadro 7, los cuales tienen un radio de consistencia de 0.03.

Cuadro 7. Valores reclasificados para obtener el suelo óptimo

Factor	Rango de distribución	Valor reclasificado	clase	peso
Tipo de suelo	Feozem, Regosol, Cambisol	2	Sub-óptimo	.2628
	Andosol	1	Óptimo	.6586
	Otros	3	No apto	.0786
			Total	1

f. Densidad del bosque

Esta variable se normalizó bajo el mismo procedimiento al antes mencionado. Los datos tienen un radio de consistencia de 0.08.

g. Limitantes

Las limitantes consideradas fueron reclasificadas, asignado el valor 1 a los sitios donde es posible la recuperación y 0 dónde no es posible. Para el caso de los grados de erosión se asignó el valor 1 al suelo estable, erosión leve y moderada, y 0 a suelos con grados de erosión fuerte y extrema. Otra limitante es la ocupación del suelo, donde el valor 1 representa a cubiertas forestales y pastizales, y 0 a las áreas sin vegetación, cuerpos de agua y áreas agrícolas.

6.3.1.1 Obtención del grado de aptitud ambiental

Una vez normalizados los factores, se realizó la escala de juicios de valor mediante la consulta de expertos forestales. El resultado y cálculo de pesos se muestran en el cuadro 8, los cuales tienen un radio de consistencia de 0.08.

Cuadro 8. Peso de los factores ambientales

	A	B	C	D	E	F	G	$\sqrt[7]{\prod_{i=j} c_{ij}}$	$\sqrt[7]{\text{col.2}}$	Peso
A	1	1	2	5	7	8	9	5040.00	3.3800	0.3009
B	1	1	3	5	6	8	9	6480.00	3.5036	0.3119
C	1/2	1/3	1	4	5	7	8	186.67	2.1108	0.1879
D	1/5	1/5	1/4	1	5	8	9	3.60	1.2008	0.1069
E	1/7	1/6	1/5	1/5	1	3	4	0.01	0.5279	0.0470
F	1/8	1/8	1/7	1/8	1/3	1	2	0.00	0.2931	0.0261
G	1/9	1/9	1/8	1/9	1/4	1/2	1	0.00	0.2153	0.0192
									11.231	1.000

A: densidad del bosque, B: altitud-temperatura, C: precipitación, D: tipo de suelo, E: pendiente, F: erosión, G: orientación

Una vez normalizada la cartografía y realizado el cálculo de pesos, se procedió a determinar la EMC, la cual se realizó en SIG Idrisi Selva. El resultado fue el mapa con los sitios óptimos en escala de byte (0-255), por lo que fue necesario generar un mapa con un nivel de adecuación de 5 clases o grados: muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto.

6.3.2 Variables de calidad de sitio

La identificación y selección de variables de calidad de sitio se realizó con revisión bibliográfica referida a variables ambientales y dasonómicas (Revolorio, 1996; Estrada, 1997; Palomino y Barra, 2003; Vela *et al.*, 2004), así como un muestreo de 42 sitios.

Endara y colaboradores (2013) recomiendan parcelas de 20 m x 50 m para muestrear variables dasonómicas, sin embargo dado que se contempló obtener información de otra serie de variables como la profundidad efectiva del suelo, altura del pastizal, profundidad de la materia orgánica, datos dasométricas, se establecieron parcelas temporales de 20 m x 20 m.

Para la toma de datos de factores externos, se utilizó el siguiente material: GPS, brújula suunto, cinta métrica de 1 m, espejo graduado de 10 cm x 10 cm, barrena saca muestras de 30 cm por 1 m, cintas métricas de 30 mts, mientras que para toma de datos de factores internos se utilizó: taladro pressler, altímetro y cinta diamétrica (Figura 10).

Definidas las variables a muestrear, se establecieron 42 sitios de muestreo, 28 fueron en zonas de bosque semidenso, 7 en fragmentado y 7 en pastizal (Figura 11). Los sitios fueron establecidos preferentemente libres de plagas, de incendios forestales severos, de extracción de madera y de zonas de pastoreo; además de estos criterios de selección, se trato de cubrir toda la variabilidad posible en los puntos seleccionados, en función de las variables a evaluar.



Figura 10. Material de campo

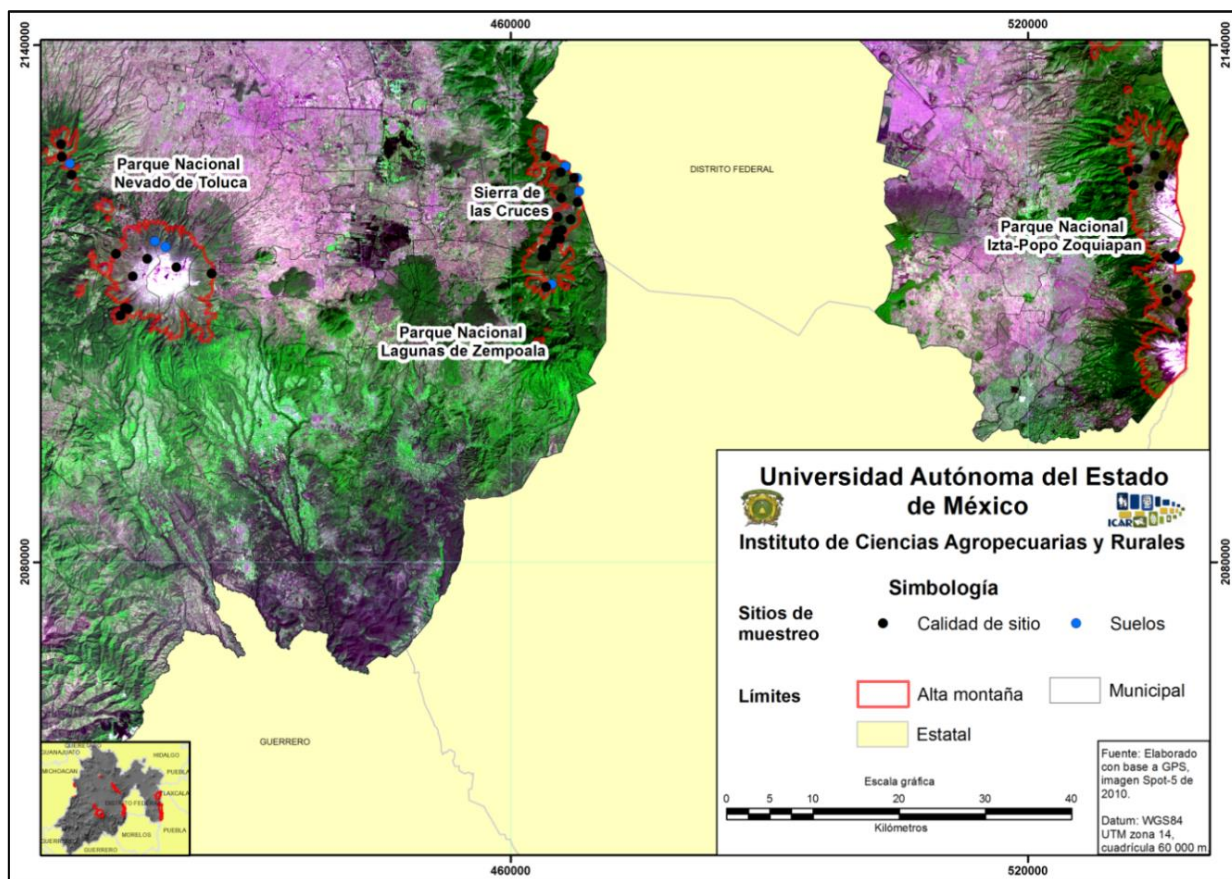


Figura 11. Muestreo de calidad de sitio y suelo

6.3.2.1 Medición de factores externos

Aunque se contó con la Base de Datos Cartográfica (BDC) de factores externos, en cada parcela se levantó información de los siguientes factores:

a. Topográficos

La variable altitud fue obtenida mediante GPS, para el caso de la pendiente ($^{\circ}$) a través de brújula suunto, además de ello, fue clasificada de acuerdo a Revolorio (1996) en: Convexa (1), recta (2), y cóncava (3), esta asignación está en función de la retención del agua, y van de lo menos (1) a lo más favorable (3). Para el caso de la orientación se generó con base al azimut del norte magnético siguiendo la dirección de la longitud de la pendiente dominante en grados.

b. Variables de suelo

La información de suelo del bosque de alta montaña se realizó en dos apartados. Por un lado la referida a la toma de datos de campo y al análisis físico-químico del suelo.

Datos de campo

- *Drenaje*. De acuerdo a la pendiente, la evaluación del drenaje se calificó como donador, receptor o normal.

- *Erosión.* La erosión del sitio fue evaluada de acuerdo a lo planteado por Guerra y Buendía (2010), (Cuadro 9).

Cuadro 9. Tipo y grado de erosión

TIPO	DESCRIPCIÓN	GRADO
<i>Laminar</i>	Es la remoción que hace el agua de manera más o menos uniforme de una capa o lamina delgada de suelo en superficie en pendiente	<i>Sin erosión.</i> Son aquellas que cuentan con una vegetación densa como para evitar algún grado de erosión. <i>Erosión leve.</i> Son áreas con cobertura vegetal arbustiva, herbácea y poca densidad arbórea donde se precia muy poca pérdida de suelo por efecto del agua o aire.
<i>Surcos o pequeños causes</i>	Es la remoción del suelo por la correntía de agua que se acumula y se concentra en las depresiones o surcos	<i>Erosión media.</i> Áreas con escasa cobertura vegetal, pastizales, matorrales o bosque muy abiertos. El suelo mineral es somero y está expuesto.
Erosión en cárcavas	Es un tipo de erosión que produce canales mayores que los producidos durante la erosión por surcos, a tal grado, que no pueden eliminarse con el laboreo	<i>Erosión severa.</i> Áreas donde el material parental está totalmente expuesto y es evidente la presencia de erosión en cárcavas de un metro o más ancho.

- *Profundidad efectiva.* Con la barrena saca muestras se perforaron 5 pozos por sitio, con una profundidad de 100 cm o hasta la presencia del material parental.
- *Espesor de la materia orgánica.* Con la ayuda de un flexómetro se midió el espesor de la capa de fermentación y capa de hojarasca.

Trabajo de laboratorio

Aunque se ha identificado que los suelos de alta montaña se caracterizan por ser de origen volcánico (INEGI, 2000), técnicamente no puede variar tanto la composición físico-química, se realizó el análisis físico-químico de 21 sitios.

Con el propósito de seleccionar polígonos con presencia de bosque, se correlacionó una cuadrícula de 1000 m x 1000 m con la ocupación del suelo 2012, resultado de ello fueron 72 zonas con posibilidad de muestrear, sin embargo debido al tiempo y accesibilidad, se decidió discriminar sitios, esto fue a partir de la correlación con la cartografía de geformas y accesibilidad (INEGI, 2000), el resultado fueron 21 sitios que cumplen con estas condiciones, 8 se localizan en el PNNT, 8 en la SC, y 5 en PNIPZ (Figura 12).



Figura 12. Zonas de muestreo de suelos dentro del área de estudio

Definidos los sitios, se ingresaron las coordenadas al GPS y se localizaron los sitios. Para establecer las zonas de muestreo, se contempló que la toma de la muestra fuera a una distancia mínima de 5 mts separado de árboles, se perforó un pozo con una profundidad de 90 cm en el que se tomaron muestras compuestas de 30 cm (0-30, 30-60 y 60-90 cm) (Figura 13), las cuales fueron etiquetadas de acuerdo al punto GPS.



Figura 13. Muestreo de suelo

Los análisis físico-químicos fueron con base a lo establecido por la NOM-021-SEMARNAT-2000, estos fueron: pH, densidad aparente, relación Ca-Mg (método versanato), fósforo (método Bray y Kurtz), N total (método Kjeldahl), materia orgánica (método Walkley y Black) y humedad. Los resultados fueron analizados a partir de la relación densidad del bosque e incendios forestales.



Figura 14. Análisis físico-químico de suelos en el laboratorio de suelos

c. Vegetación y porcentaje de luminosidad

La altura del pastizal fue medida en los extremos de la parcela 20 m x 20 m, así como en el centro del mismo (Figura 15). Para el caso del porcentaje de luminosidad, se generó mediante un espejo graduado de 1 a 10 cm, la toma del porcentaje fue de acuerdo al número de recuadros descubiertos de follaje, posteriormente fueron convertidos a porcentaje.



Figura 15. Medición de altura del pastizal, Parque Nacional Izta–Popo Zoquiapan

6.3.2.2 *Medición de factores internos*

a. Estructura y regeneración

En las parcelas de 20 m x 20 m, se tomaron datos de variables dasométricas y categorías de regeneración de acuerdo a lo planteado por Valdez (2002) (Cuadro 10).

Cuadro 10. Clasificación de la regeneración

Clase	Tamaño
Plántula	> a 30 cm de altura
Brinzal	$\geq 0.3 < 1.5$ m de altura
Latizal	≥ 1.5 m altura < 2.5 cm DAP
Fustal	≥ 2.5 DAP

La altura total (AT) de la regeneración (plántulas, brinzales y latizales) se midieron con cinta métrica, también se determinó la edad a partir del número de verticilos. Para el caso de los fustales, la altura total, comercial y de fuste limpio, se estimó con clinómetro digital, el DAP fue obtenido con cinta diamétrica, mientras que el área basal del sitio se estimó mediante datos de altura (ecuación 4).



Figura 16. Regeneración natural en la Sierra de las Cruces, Xalatlaco, 2012

$$G = \sum d_i^2 * 0.7854 \qquad \text{Área basal (4)}$$

Donde: G= área basal/parcela (m²)

di= DAP de cada árbol individual de la parcela

b. Árboles semilleros

La identificación de árboles semilleros se basó en las características planteadas por Márquez y colaboradores (2009), bajo esto, se identificaron 18 sitios, de los que se obtuvieron los siguientes datos: altura total, altura comercial, diámetro a la altura de pecho, diámetro de copa y edad al 1.30 mts, número de conos. La edad se estimó a partir del conteo del número de anillos, obtenidos de virutas extraídos al 1.30 m (Figura 17).

c. Índice de sitio

Para realizar el análisis del índice de sitio, se seleccionaron los dos árboles más representativos (Castaños, 1962) y (Stiff *et al.*, 1991) de cada parcela. En total de identificaron 31 sitios con presencia de arboles con las siguientes características:

- aquellos con DAP mayor a 2.5 cm;
- árboles sin evidencia de plagas forestales (*Arceuthobium globosum*, *A. vaginatum* y *Dendroctonus adjunctus*), sin bifurcaciones;
- sin daños en el fuste y con más de 40% de copa viva.

Dado que en el presente estudio, el índice de sitio no tienen un fin económico sino de conservación de recursos forestales maderables, no fue necesario derribar árboles. Para determinar la edad, se extrajo una viruta a 1.30 m de altura después de la base del árbol, a la cual se le determinó la edad mediante el conteo de anillos (Figura 17).



Figura 17. Muestreo “datos de índice de sitio”

Se graficaron los pares de datos edad-altura obtenidos de los 62 árboles y mediante el diagrama de dispersión se observó que no existen valores extremos o puntos de influencia que sesguen el ajuste de los modelos de Schumacher y Chapman-Richards (Figura 18).

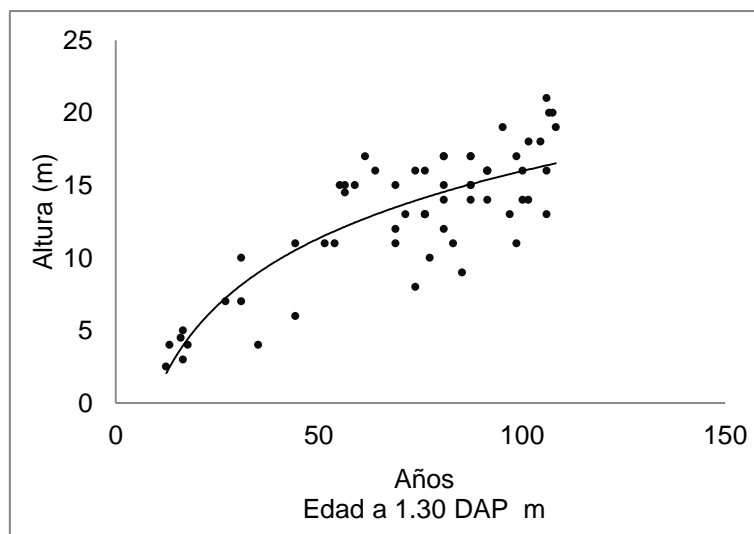


Figura 18. Dispersión de los datos edad-altura en el bosque de alta montaña

Dado que se trata de un bosque de lento crecimiento (*P. hartwegii* Lindley), y en general, las especies de *Pinus* tienen este comportamiento (Musálem, 1977; Rodríguez, 1980), se definió la edad media (72 años) como la edad base.

6.3.3 Análisis de la información

Con la información obtenida en campo, se definieron los rangos de los factores: profundidad del suelo, espesor de la materia orgánica, altura del pastizal, regeneración, producción de semilla, porcentaje de luminosidad e índice de sitio.

Una vez realizado el análisis de la información, se establecieron los criterios para identificar los sitios con aptitud para la recuperación del bosque de alta montaña.

- Terrenos con evidencia de producción de semilla;
- sitios con las condiciones de vegetación arbustiva que permita el crecimiento la especie forestal;
- y espacios con un índice de sitio que permita establecer zonas de recuperación.

6.3.3.1 Regeneración

Los grados de aptitud de la regeneración (Cuadro 11), se establecieron de acuerdo al número de DS (desviación estándar). El primer grado (A) se consideró con 3.79 DS que va de los 37 a 216 individuos, para el segundo (B) 1 DS que va de 1 a 37 árboles, y 3 (C) sitios que no contaron con individuos. La ponderación tiene una radio de consistencia de 0.02.

Cuadro 11. Grado aptitud (Regeneración)

Grado de aptitud	A	B	C	$\prod_{i=j}^3 \Pi_{ci}$	$\sqrt[3]{\text{col.2}}$	peso
A	1	2	9	18	2.6207	0.5969
B	1/2	1	7	3 1/2	1.5183	0.3458
C	1/9	1/7	1	0	0.2513	0.0572
					4.3904	1

6.3.3.2 Semilleros

Se obtuvo una máxima de 335 conos, una mínima de 15; mientras que la media fue de 136 conos, se tiene una desviación estándar de 99 conos. Con esta información fueron generados los rangos de aptitud (Cuadro 12), los cuales tienen un radio de consistencia de 0.03.

Cuadro 12. Grado aptitud (semilleros)

Grado	Rango	A	B	C	$\prod_{i=j}^3 \Pi_{ci}$	$\sqrt[3]{\text{col.2}}$	peso	
Apto	>136	A	1	2	9	18	2.6207	0.5984
Sub-óptimo	1-136	B	1/2	1	7	3 1/2	1.5183	0.3467
No apto	Sin presencia de conos	C	1/9	1/8	1	0	0.2404	0.0549
							4.3794	1.0000

6.3.3.3 Suelos

Aunque se realizaron análisis físico-químicos del suelo, para el análisis de calidad de sitio sólo se consideró la profundidad efectiva del suelo y espesor de la materia orgánica.

a. Profundidad efectiva del suelo

La profundidad óptima se realizó con base a lo planteado por Arriaga *et al.*, (1994), y los datos obtenidos en campo, donde el valor mínimo fue de 21 cm y el máximo 100 cm, con una media

de 82.9 cm. A partir de estos datos, se establecieron los rangos de aptitud (Cuadro 13), los cuales tienen un radio de consistencia de 0.03.

Cuadro 13. Grado de aptitud del factor profundidad del suelo

Grado	Rango	A	B	C	$\prod_{i=j}^3 \Pi_{ci}$	$\sqrt[3]{\text{col.2}}$	peso	
Apto	> 30	A	1	3	9	27	3.0000	0.6716
Sub-óptimo	21-30	B	1/3	1	5	1.67	1.1856	0.2654
No apto	< 20	C	1/9	1/5	1	0	0.2811	0.0629
							4.4668	1.0000

6.3.3.4 Vegetación

a. Espesor de la materia orgánica

Los grados de aptitud fueron establecidos de acuerdo con Centeno y Ruiz, (1993) citado por Estrada (1997). En este proceso se consideraron los datos obtenidos de profundidad de la materia orgánica y capa de hojarasca. La ponderación mostró un radio de consistencia de 0.04 (Cuadro 14).

Cuadro 14. Grado aptitud de espesor de la materia orgánica

Grado	Rango(cm)	A	B	C	$\prod_{i=j}^3 \Pi_{ci}$	$\sqrt[3]{\text{col.2}}$	peso	
Apto	1-5	A	1	5	8	18	2.6207	0.5969
Sub-óptimo	Mayor a 5	B	1/5	1	3	3 1/2	1.5183	0.3458
No apto	Menor a 1	C	1/8	1/3	1	0	0.2513	0.0572
							4.3904	1

b. Altura de pastizal

Para generar los rangos óptimos de esta variable (Cuadro 15), primero se clasificó la altura total del pastizal en clases altura de 5 cm, se obtuvieron 17 clases, y mediante un análisis de varianza del número de árboles por clases de altura del pastizal, se obtuvieron los rangos de aptitud, en el que se identificó que las clases 7, 9, 10 es donde se presentó el mayor número de árboles, mientras que las clases 1, 2, 3, 4, 5 y 6 presentaron un comportamiento heterogéneo, por lo que fueron definidas como sub-óptimas, finalmente, las clases 11, 12, 13, 14, 15, 16 fueron definidas como no aptos debido al bajo número de individuos. La ponderación mostró un radio de consistencia de 0.05 (Cuadro 16).

Cuadro 15. Datos estadísticos

CAP	No. Sitios	Media	D.E.	E.E.	Mín	Máx	Suma Cuad.
1	2	35.5	50.2	35.5	0	71	5041
2	1	6	0	0	6	6	36
3	4	45	41.75	20.88	14	106	13330
4	4	13.25	15.31	7.65	0	27	1405
5	2	11.5	12.02	8.5	3	20	409
6	5	18	23.46	10.49	0	59	3822
7	3	58.33	61.49	35.5	17	129	17771
8	1	26	0	0	26	26	676

9	6	62.33	77.2	31.52	0	215	53112
10	2	99	63.64	45	54	144	23652
11	4	5.5	4.43	2.22	0	10	180
12	2	17	22.63	16	1	33	1090
14	2	6.5	9.19	6.5	0	13	169
15	2	2.5	2.12	1.5	1	4	17
16	1	0	0	0	0	0	0
17	1	5	0	0	5	5	25

Cuadro 16. Grado aptitud de altura de pastizal

Grado	Rango(cm)	A	B	C	$\sum_{i=j}^3 \Pi_{ci}$	$\sqrt[3]{\text{col.2}}$	peso	
Apto	45.1-50	A	1	2	9	18	2.6207	0.5891
Sub-óptimo	1-45	B	1/2	1	8	4	1.5874	0.3568
No apto	>50	C	1/9	1/8	1	0	0.2404	0.0540
							4.4485	1.0000

6.3.3.5 Índice de sitio (IS)

Los resultados de la regresión no lineal de la curva guía, mostraron que el modelo que mejor se ajusta a la relación edad-altura a una edad base de 72 años es el modelo de Schumacher (Cuadro 17).

Cuadro 17. Estadísticos obtenidos

MODELOS	EMC	Estimadores	Nivel de confianza
Schumacher	406.5822	$\beta_0 = 21.5086$	95%
		$\beta_0 = 30.8537$	
Chapman-Richard	1265.935	$\beta_0 = 13.0323$	95%
		$\beta_1 = 1.9900$	
		$\beta_1 = 1.04$	

La ecuación de índice de sitio ajustada (ecuación 2.1) permitió clasificar el índice de sitio en 5 clases: muy alto (A), alto (B), medio (C), bajo (D) y muy bajo (E). Los rangos de aptitud fueron definidos con base a la media (13.1m) y desviación estándar (4.8 m). La ponderación de estas clases tiene un radio de consistencia de 0.02.

Cuadro 18. Rangos de aptitud del factor IS

Grado	Rango (m)	A	B	C	D	E	$\sum_{i=j}^5 \Pi_{ci}$	$\sqrt[5]{\text{col.2}}$	peso	
Muy alto	>13.1	A	1	2	3	7	9	378	3.27716539	0.48430756
alto	8.3-13.1	B	1/2	1	1	5	3	7.5	1.49627787	0.22112362
medio	3.5-8.3	C	1/3	1	1	3	2	2	1.14869835	0.16975747
bajo	0-3.5	D	1/7	1/5	1/3	1	1	0.01	0.39424132	0.05826195
muy bajo	Sin dato	E	1/9	1/3	1/2	1	1	0.02	0.45032001	0.0665494
									6.76670295	1

6.3.3.5 Luminosidad

Los datos de luminosidad no mostraron una relación dependiente entre el porcentaje de luz y el número de individuos (regeneración). Por ello, los rangos óptimos de distribución se aplicaron de

acuerdo a la información de (Willan, 1994 y Márquez *et al.*, 2009), que consideran que en este tipo de bosques la luminosidad debe ser por lo menos el 40% (Alejano, 2003).

De acuerdo a los datos obtenidos en campo, la mínima luminosidad es de 33 % y la máxima de 100 %, con una media de 79 % y una desviación estándar de 19 %. A partir de estos valores se establecieron los rangos de aptitud, los cuales tienen un radio de consistencia de 0.03.

Cuadro 19. Rangos de aptitud del factor luminosidad en el área de estudio

Grado	Rango (%)	A	B	C	$\prod_{i=j}^3 \Pi_{ci}$	$\sqrt[3]{\text{col.2}}$	peso	
Apto	Mayor a 40	A	1	3	9	27	3.0000	0.6716
Sub-óptimo	33-40	B	1/3	1	5	1 2/3	1.1856	0.2654
No apto	Menor a 33	C	1/9	1/5	1	0.02	0.2811	0.0629
							4.4668	1.0000

Las restricciones representan las alternativas donde no es posible establecer zonas de recuperación, las cuales fueron asignadas con el valor 0; mientras que el valor 1 corresponde a los sitios candidatos para desarrollar actividades de recuperación del bosque. En este trabajo, las restricciones tienen como propósito impedir que la identificación de zonas de recuperación se localicen sobre zonas afectadas por plagas forestales, principalmente por *Arceuthobium globosum* y *A. vaginatum* o *Dendroctonus adjunctus*.

6.3.3.4 Obtención del grado de aptitud de calidad de sitio

Una vez normalizados los factores y definidas las restricciones, y con base a la consulta de expertos forestales, se realizó la ponderación de los factores a partir de la comparación por pares (Saaty, 1980). Como primer paso, se determinó la razón de consistencia de los juicios de cada uno de los expertos, en la que se identificaron inconsistencias en dos de ellas. Finalmente se utilizó la opinión de tres, a partir de ésta y se generó la matriz de comparación general (Cuadro 20).

Cuadro 20. Ponderación de factores de calidad de sitio

	IS	R	PS	LU	EMO	AP	PES	$\prod_{i=j}^7 \Pi_{ci}$	$\sqrt[7]{\text{col.2}}$	peso
IS	1	1	2	3	5	7	9	1890	2.9381	0.2964
R	1	1	1	1	3	5	9	135	2.0153	0.2033
PS	1/2	1	1	1	5	7	8	140	2.0258	0.2043
LU	1/3	1	1	1	3	5	9	45	1.7226	0.1738
EMO	1/5	1/3	1/5	1/3	1	2	5	0	0.6410	0.0647
AP	1/7	1/5	1/7	1/5	1/2	1	2	0	0.3621	0.0365
PES	1/9	1/9	1/8	1/9	1/5	1/2	1	0	0.2085	0.0210
								2210	9.9133	1.0000

IS (Índice de sitio), R (Regeneración), PS (Producción de semilla), EMO (Espesor de la materia orgánica), AP (Altura del pastizal), PES (Profundidad efectiva del suelo).

Una vez obtenidas las zonas óptimas, se aplicó el nivel de adecuación con cinco clases, basadas en los estadísticos del análisis de la EMC.

6.4 Identificación de zonas óptimas para la recuperación del bosque de alta montaña del Estado de México

Una vez obtenidos el nivel de aptitud ambiental y de calidad de sitio, se realizó un cruce de información entre ambas Bases de Datos y se generó la identificación de zonas óptimas para la recuperación del bosque de alta montaña del Estado de México. Estas fueron reclasificadas en nivel alto, medio, bajo y no apto. Este último para aquellos sitios que no cuentan con la calidad ambiental para establecer dichas zonas.

7. RESULTADOS

Artículo enviado a la revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente

Análisis del grado de aptitud ambiental para la recuperación el bosque de alta montaña del Estado de México

José Luis López García, Angel Rolando Endara Agramont, Sergio Franco Maass, Jesús Soria Ruiz

Artículo en revisión

Análisis de la calidad de sitio para la recuperación del bosque de alta montaña del Estado de México

José Luis López García, Angel Rolando Endara Agramont, Sergio Franco Maass, Jesús Soria Ruiz

Zona aptas para la recuperación del bosque de alta montaña del Estado de México

Análisis físico-químico de los suelos de alta montaña del Estado de México

APTITUD



AMBIENTAL



7.1 Análisis del grado de aptitud ambiental para la recuperación del Bosque de alta montaña del Estado de México

Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente
ANÁLISIS DEL GRADO DE APTITUD AMBIENTAL PARA LA RECUPERACIÓN DEL
BOSQUE DE ALTA MONTAÑA DEL ESTADO DE MÉXICO
 --Manuscript Draft--

Manuscript Number:	
Full Title:	ANÁLISIS DEL GRADO DE APTITUD AMBIENTAL PARA LA RECUPERACIÓN DEL BOSQUE DE ALTA MONTAÑA DEL ESTADO DE MÉXICO
Short Title:	Zonas óptimas para la recuperación del bosque
Article Type:	Original study/Estudio original
Section/Category:	Silvicultura y manejo forestal / Forestry and forest management
Keywords:	Evaluación multicriterio, zonas óptimas, ocupación del suelo, factores ambientales, nivel de adecuación
Corresponding Author:	Angel Rolando Endara Agramont, Dr. Universidad Autónoma del Estado de México MEXICO
Corresponding Author Secondary Information:	
Corresponding Author's Institution:	Universidad Autónoma del Estado de México
Corresponding Author's Secondary Institution:	
First Author:	José Luis López García, Especialista
First Author Secondary Information:	
Order of Authors:	José Luis López García, Especialista Angel Rolando Endara Agramont, Dr. Sergio Franco Maass, Dr. Jesús Soria Ruíz, Dr.
Order of Authors Secondary Information:	
Abstract:	El bosque de alta montaña del Estado de México se distribuye a partir de los 3500 msnm, tiene una superficie 35806 ha, de las cuales 13158 ha presentan diversos grados de disturbio. Partiendo de este conocimiento se planteó, como objetivo, analizar el grado de aptitud ambiental para la recuperación del bosque de alta montaña del Estado de México. El método más utilizado para analizar la aptitud del territorio es el de jerarquías analíticas, parte por definir un conjunto de criterios de aptitud, buscando con ello obtener los rangos de distribución óptima de cada uno de los factores ambientales. Aplicando este método fue posible estimar que, de las 45105 ha de la alta montaña en el centro de México (Parque Nacional Nevado de Toluca, Sierra de las Cruces y Parque Nacional Izta-popo Zoquiapan), 22303 ha cuentan con criterios de elegibilidad altos.
Suggested Reviewers:	Todd Fredericksen, Dr. Ferrum College tfredericksen@ferrum.edu especialista en manejo forestal Humberto Nelson Sainz Mendoza, Dr. Universidad Pública de El Alto humbertosainz@hotmail.com Especialista en recuperación de suelos Fernando Paz, Dr. Colegio de Posgraduados Montecillo pellat@colpos.mx

Powered by Editorial Manager® and ProduXion Manager® from Aries Systems Corporation

Opposed Reviewers:	Especialista en dinámica de bosques
--------------------	-------------------------------------

ANÁLISIS DEL GRADO DE APTITUD AMBIENTAL PARA LA RECUPERACIÓN DEL BOSQUE DE ALTA MONTAÑA DEL ESTADO DE MÉXICO

José L. López-García

;
1

Afiliación: Universidad Autónoma del Estado de México

Correo electrónico: geojoshe_07@hotmail.com

Angel Rolando. Endara-Agramont

1*
, (
*

Autor para correspondencia)

Afiliación: Universidad Autónoma del Estado de México

Correo electrónico: arendaraa@uaemex.mx

Sergio Franco-Maass

,
1

Afiliación: Universidad Autónoma del Estado de México

Correo electrónico: sfrancom@uaemex.mx

Jesús Soria-Ruiz

2

Afiliación: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias

Correo electrónico:

1

Instituto de Ciencias Agropecuarias y Rurales de la UAEM. Carretera Toluca–
Atlacomulco Km. 14.5, C.P. 50000 Toluca, México. Tel./ Fax: (01-722) 296-55-52.

2

Laboratorio de Geomática, INIFAP. Vial. Adolfo López Mateos Km. 4.5 Carr.
Toluca-Zitácuaro, San José Barbabosa, Zinacantepec, Estado de México, C.P.

51350.



**EDITORES REVISTA CHAPINGO
SERIE CIENCIAS FORESTALES**

Por este medio, me permito someter ante su prestigiosa revista el artículo titulado ANÁLISIS DEL GRADO DE APTITUD AMBIENTAL PARA LA RECUPERACIÓN DEL BOSQUE DE ALTA MONTAÑA DEL ESTADO DE MÉXICO, bajo el siguiente orden a autores: José L. López-García; Angel Rolando Endara-Agramont, Sergio Franco-Maass, Jesús Soria-Ruiz.

Sin otro particular por el momento y en espera de contar con su valiosa respuesta, me despido de la manera más atenta.

Atentamente,
PATRIA, CIENCIA Y TRABAJO
"2013, 50 ANIVERSARIO LUCTUOSO DEL POETA HERIBERTO ENRIQUEZ"



Dr. Angel Rolando Endara Agramoni

c.c.p. archivo



Unidad San Cayetano Km. 14.5 Carretera Toluca- Atlacomulco, teléfonos: (722) 296 55 52, 180 61 24 y 180 61 36

ANÁLISIS DEL GRADO DE APTITUD AMBIENTAL PARA LA RECUPERACIÓN DEL BOSQUE DE ALTA MONTAÑA DEL ESTADO DE MÉXICO

Highlights

- 4525 ha de bosque fragmentado.
- Los rangos de aptitud de cada factor difieren a los establecidos en otros trabajos.
- El grado de aptitud óptimo ambiental se localiza principalmente en áreas naturales protegidas.

RESUMEN

El bosque de alta montaña del Estado de México se distribuye a partir de los 3500 msnm, tiene una superficie 35806 ha, de las cuales 13158 ha presentan diversos grados de disturbio. Partiendo de este conocimiento se planteó, como objetivo, analizar el grado de aptitud ambiental para la recuperación del bosque de alta montaña del Estado de México. El método empleado para analizar la aptitud del territorio es el de jerarquías analíticas, parte por definir un conjunto de criterios de aptitud, buscando con ello obtener los rangos de distribución óptima de cada uno de los factores ambientales. Aplicando este método fue posible estimar que de las 45105 ha de la alta montaña del Estado de México (Parque Nacional Nevado de Toluca, Sierra de las Cruces y Parque Nacional Izta-popo Zoquiapan), 22303 ha cuentan con criterios de elegibilidad altos.

Palabras clave: Evaluación multicriterio, zonas óptimas, ocupación del suelo, factores ambientales, nivel de adecuación

ABSTRACT

The high mountain forest of the State of Mexico is distributed from the 3500 meters above sea level (masl) meters, it covers an area 35806 ha, of which 13158 has presented various degrees of disturbance. The objective of this paper is to analyze the degree of environmental suitability for the recovery of high mountain forest of the State of Mexico. The method used to analyze the ability of the territory is the analytical hierarchy, which the starting point is defined a set of eligibility criteria, in order to look for the optimal ranges of each of the environmental factors. Using this method it was possible to estimate that, of the 45105 has High Mountain in central Mexico (Nevado de Toluca National Park, Sierra de las Cruces and-popo Izta Zoquiapan), 22303 have high eligibility criteria.

Key words: Multicriteria evaluation, optimal zones, land occupation, environmental factors, level of adequacy

INTRODUCCIÓN

Los bosques de alta montaña en México son aquellos que se ubican por encima de los 3500 msnm (Endara, Calderón-Contreras, Nava & Franco-Maass 2013), además juegan un papel importante como proveedores de servicios ambientales, tales como la regulación del ciclo hidrológico, la captura de carbono y el mantenimiento de la biodiversidad (García, 1998).

En el Estado de México se encuentran establecidos sobre los picos volcánicos más elevados, tales como, Popocatepetl, Iztaccíhuatl y el Xinantécatl, así como la Sierra de las Cruces (SC). Se trata de zonas con una importante vocación forestal y poco apta para el desarrollo de actividades agrícolas, pero dada su proximidad a los grandes centros de población, se encuentran sujetas a serios procesos de deterioro y cambio de uso del suelo. Bobbink et al. (2003) estimaron una reducción del 13.2% en la densidad de los bosques del Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan (PNIPZ); por su parte Franco, Regil-García, González, y Nava-Bernal. (2006) mencionan que el Parque Nacional Nevado de Toluca (PNNT) presenta 8000 ha de su cobertura forestal con problemas de fragmentación. Este problema se hace más evidente en los análisis de cambio en la ocupación (Velázquez et al., 2002; Killeen et al., 2005; Berlanga et al., 2009; Nájera et al., 2010; Chávez et al., 2012) y recientemente con el uso de imágenes satelitales fusionadas (Flusster, 2007; Wald et al., 2009; Villegas et al., 2011) se adquiere un mayor nivel de detalle de las cubiertas en el territorio.

Ante este escenario se hace imprescindible la recuperación y conservación de los bosques nativos. Si bien, la práctica habitual para la recuperación de los ecosistemas degradados se ha basado en la reforestación (Elvira, 2008), autores como Arriaga et al. (1994) señalan que éstas suelen realizarse con especies exóticas como *Eucalyptus* spp., y *Pinus radiata*, las cuales no cumplen con las condiciones ambientales mínimas para la conservación. Ante ello, Lamprecht (1990) señala que el establecimiento del arbolado deberá realizarse en terrenos con aptitud ambiental y topográfica, esto implica considerar el uso de especies nativas que se han adaptado a las condiciones ambientales del sitio.

Para establecer zonas de recuperación de bosques, es prioritario identificar una serie de variables ambientales que influyen en el crecimiento y adaptación de las especies forestales, como la altitud, pendiente, orientación, temperatura, precipitación (Revolorio, 1996; Palomino y Barra, 2003; Ravelo y Abril, 2007), así como grados de erosión y la densidad del bosque.

Una de las metodologías que ha permitido la identificación de zonas óptimas en términos espaciales, es la integración de Sistemas de Información Geográfica (SIG), Percepción Remota y técnicas de Evaluación Multicriterio (EMC). Trabajos como los de Mena y Montecinos (1996);

Regil y Franco (2009); Alcalá et al. (2009), López (2011) y Pineda, Bosque-Sendra, Gómez-Delgado, Franco-Plata, Antonio-Némiga, y Manzano-Solis. (2012), identificaron sitios óptimos para el establecimiento de especies forestales, la cual se basó en información predeterminada.

Con base en lo antes mencionado, se plantea analizar el grado de aptitud ambiental para la recuperación del bosque de alta montaña del Estado de México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para delimitar la alta montaña del Estado de México, se consideró como límite inferior la cota 3500 msnm (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2000) (Figura 1). El bosque de alta montaña representa el 79% de la superficie total de la alta montaña, de ello, el bosque de *P. hartwegii* Lindley ocupa 34520 ha, esto la convierte en la especie forestal más importante de la alta montaña en el estado.

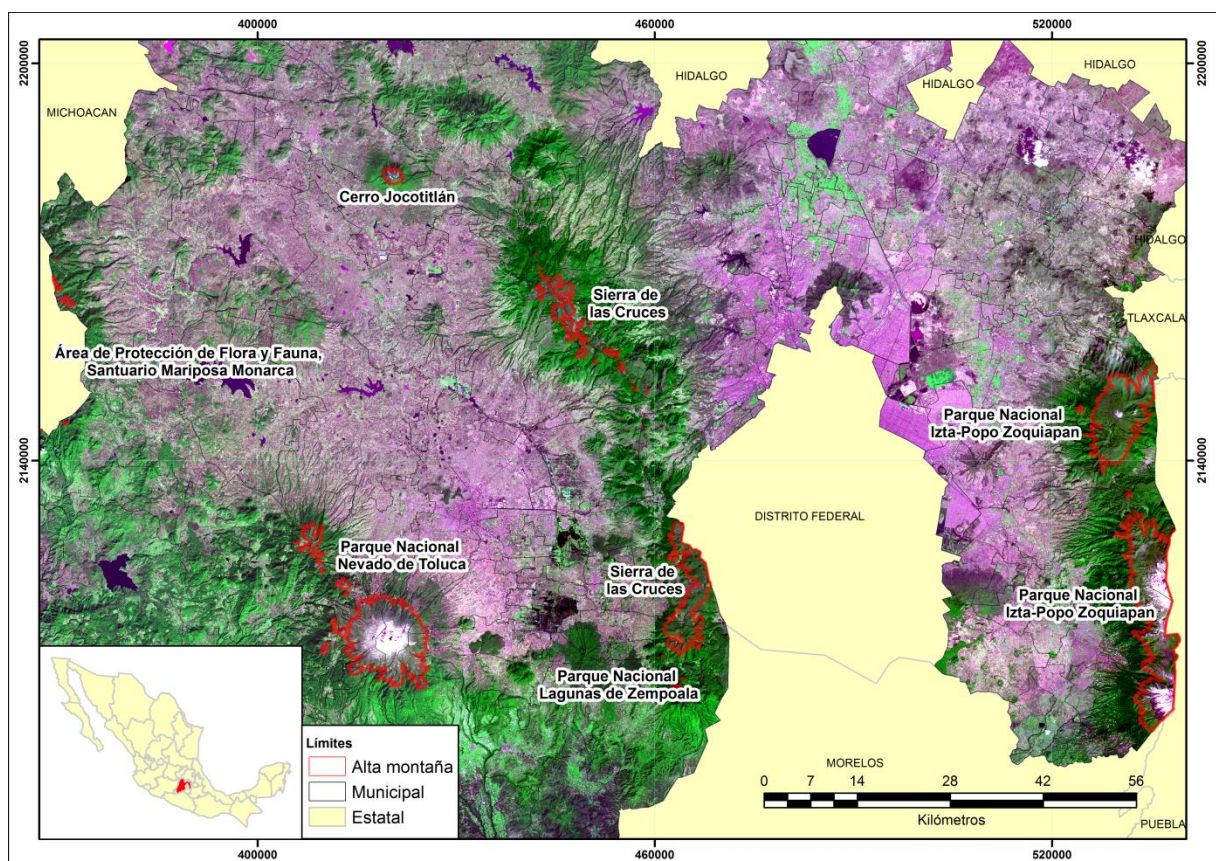


Figura 1. Zona de alta montaña del Estado de México.

Ocupación del suelo, 2012

Para generar y analizar la ocupación del suelo 2012, se adquirieron espaciomasas escala 1: 50,000 de imágenes satelitales 2010 del Sensor Spot-5 (Système Probatoire d'Observation de la Terre) en modo multiespectral y pancromático (IGCEM, 2010). La interpretación visual de las cubiertas forestales (*Pinus hartwegii* Lindley, *Pinus pseudostrobus*, *Pinus michoacana*, *Abies religiosa*, *Quercus laurina* Humb et Bonpl, *Alnus acuminata* Humboldt, Bonpland & Kunth),

agrícola, pastizal, cuerpos de agua y áreas sin vegetación, se realizó a partir imágenes fusionadas en combinación RGB 2-1-3 y bajo los principios del análisis visual de imágenes de satélite propuestos por Chuvieco (1996). De acuerdo a la matriz de confusión, los resultados mostraron una confiabilidad del 90.2%, siendo la categoría de *P. hartwegii* Lindley en la condición de fragmentado y el pastizal donde se presentó el mayor grado de incertidumbre.

Identificación de áreas óptimas

Partiendo de la información de ocupación del suelo 2012, se recopilaron datos de altitud, pendiente y orientación en 150 puntos del bosque de *P. hartwegii* Lindley y 75 en cubiertas no forestales, posteriormente fueron interrelacionados a nivel de pixel con las variables topográficas (altitud, pendiente, orientación), climáticas (temperatura y precipitación) y suelo (ocupación del suelo, tipo de suelo y grados de erosión). Obtenidos estos datos y con base a CONAFOR (2007), se establecieron los rangos de aptitud para cada factor (Cuadro 1).

Cuadro 1. Rangos óptimos de distribución del bosque de alta montaña del Estado de México.

Fuente	Factor	No apto	Sub-óptimo	Óptimo
Generados a partir de MDE, INEGI 2000	Altitud (msnm)	< a 2900.0	2900.1 a 3509.9	3510.0 a
		> a 4100.1	3590.1 a 4100.0	3590.0
	Pendiente °	< a 2.4	2.5 a 4.9	5.0 a 12.0
		> a 22.1	12.1 a 22.0	
	Orientación °	-	90.1 a 270.0	0.0 – 90.0 270.1 a 360
Cuervo <i>et al.</i> , (2011)	Temperatura (° C)	< a 4.0	4.1 a 4.9	5.0 a 8.0
		> a 9.1	8.1 a 9.0	
INEGI, 2000	Precipitación (mm)	< a 900.0	900 a 999.9	1000.0 a
		>a 1260.0	1200.1 a 1260.0	1200.0
	Tipo de suelo	Otros	Feozem, regosol y cambisol	Andosol
INEGI, 2009	Erosión	Extrema y no aplica	Leve-moderada	Suelo estable
Propia	Densidad del bosque	del Otras cubiertas	Fragmentado-denso	Semidenso

Para efecto de aplicar la EMC fue necesario estandarizar los factores, la cual se realizó en el módulo fuzzy de Idrisi Selva. El método empleado fue la función borrosa de pertenencia sigmoïdal simétrica.

Previa a la estandarización, el factor altitud y temperatura fueron integrados como único factor debido a la alta correlación que presentan (Pineda et al., 2012). El factor precipitación y pendiente fueron estandarizados, mientras que la orientación, densidad del bosque, tipo de suelo y erosión del suelo, fueron reclasificados y posteriormente estandarizados (Cuadro1). La estandarización de la densidad del bosque y erosión del suelo mostraron un radio de consistencia de 0.08, mientras que el tipo de suelo mostró un radio de 0.03.

Cuadro 2. Valores reclasificados para obtener la mejor orientación de ladera.

Exposición solar	Valores en grados	Valor reclasificado
Sur	180.0	2
Suroeste	180.1 a 270.0	2
Sureste	90.1 a 180.0	2
Oeste	270.0	2
Este	90.0	2
Noroeste	270.1 a 360.0	1
Noreste	0.1 a 89.9	1
Norte	0.0	1

Cuadro 3. Pesos del factor tipo de suelo, grados de erosión y ocupación del suelo en el área de estudio.

Variable	Reclasificación				Pesos		
	1	2	3		óptimo	Sub óptimo	- No apto
T. Suelo	Andosol	Feozem, cambisol	Regosol	Otros	0.6586	0.2628	0.0786
G. Erosión	Estable	Leve-moderada	Fuerte, extrema, no aplica		0.6483	0.2297	0.1220
O. suelo	Semidenso	Denso-fragmentado	Otras cubierta		0.5842	0.2318	0.1840

Las limitantes consideradas en este análisis fueron grado de erosión y ocupación del suelo; para el primer caso, se asignó 1 a los grados de erosión leve, moderada suelo estable, y 0 a grados de erosión fuerte y extrema; para el segundo, se asignó el valor de 1 a cubiertas forestales y pastizales, y 0 a las áreas sin vegetación, cuerpos de agua y agrícola.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

El bosque de alta montaña del Estado de México tiene una superficie de 35806 ha, de las cuales 22648 ha corresponden a bosque denso (63%); siendo *P. hartwegii* Lindley el de mayor superficie (Cuadro 4). Por su parte, el bosque semidenso contó con 8633 ha (24%) y el bosque fragmentado tiene una superficie de 4525 ha (13% de la superficie total). Este último es resultado de la afectación por plagas, incendios, cambios de uso de suelo (Franco et al., 2006), muestra de ello es la reducción del número de árboles/ha, Villers et al. (1998) reportaron 170 árboles/ha, mientras que Endara et al. (2013) reportaron 150 árboles/ha en el bosque del PNNT.

Resulta alarmante que a pesar de la altitud > 3500 msnm, las actividades agrícolas tienen presencia en los bosques de la alta montaña, principalmente en el PNNT con 224 ha ocupadas por cultivos (Figura 2). Este y las actividades de pastoreo están ocasionando la fragmentación de los bosques, de ahí, la importancia por identificar sitios con aptitud ambiental para la recuperación de este tipo de bosque.

Cuadro 4. Ocupación del suelo, 2012 del área de estudio

Densidad	Ocupación del suelo	cve	Tasa (%)	Superficie (ha)
Denso	<i>Pinus hartwegii</i>	phd	49.2	22194.2
Semidenso	<i>Pinus hartwegii</i>	phsm	17.5	7909.3
Fragmentado	<i>Pinus hartwegii</i>	phfg	9.8	4416.9
Denso	<i>Abies religiosa</i>	ard	0.5	219.5

Semidenso	<i>Abies religiosa</i>	ar	1.3	607.8
Fragmentado	<i>Abies religiosa</i>	arfg	0.2	78.5
Denso	<i>Pinus pseudostrobus</i>	ppd	0.5	203.8
Semidenso	<i>Pinus pseudostrobus</i>	ppsm	0.0	12.2
Fragmentado	<i>Pinus pseudostrobus</i>	ppfg	0.1	27.7
Denso	<i>Pinus michoacana</i>	pmd	0.0	4.9
Denso	<i>Alnus jorullensis</i>	ad	0.1	26.4
Semidenso	<i>Alnus jorullensis</i>	asm	0.1	30.6
Semidenso	<i>Quercus laurina</i>	q	0.2	73.4
Pastizal	Pastizal	p	12.3	5551.6
Otro	Agrícola	a	0.5	224.7
Otro	Suelo desnudo	sd	6.4	2882.7
Otro	Cuerpo de agua	ca	0.0	22.0
			100.0	45109.9

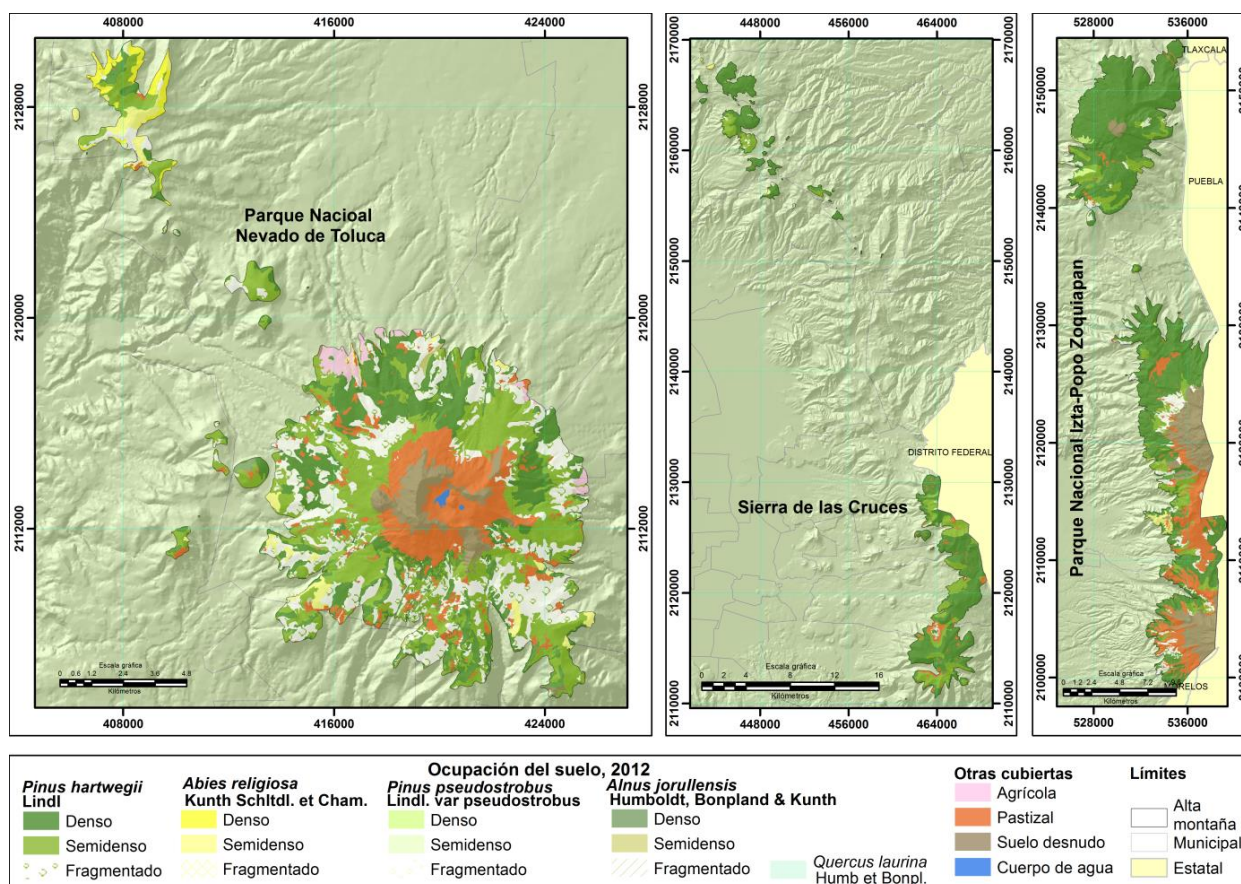


Figura 2. Ocupación del suelo de la alta montaña del Estado de México.

Cuadro 5. Superficie por factor y grado de aptitud del área de estudio.

Factor	Óptimo (Ha)	Sub-óptimo (Ha)	No apto (Ha)
Altitud	9097	32142	8852
Pendiente	18359	19078	7359
Orientación	24453	19107	0
Temperatura	26567	16469	2044
Precipitación	27449	9385	8292
Tipo de suelo	20009	22966	2053
Erosión	7701	13482	5731
Densidad del suelo	22648	4520	8614

De acuerdo a la estandarización de cada factor, las superficies no aptas son bajas en relación a las óptimas, siendo el PNIPZ, PNNT y SC los sitios más representativos. A nivel de factor, la altitud óptima presenta el mismo comportamiento en las tres zonas, esto permite sustentar lo reportado por Endara, Franco-Maass, Nava, Valdez-Hernández, y Fredericksen (2012) donde, mencionan que hay especies como en *P. hartwegii* que se han adaptado a un nivel altitudinal mayor a los 3500 msnm. Otra evidencia de esto, es la adaptación a condiciones de pendientes (5°-12°) y orientación (0°-90° y 270°-360°) de los bosques del PNNT y PNIPZ, los resultados mostraron que el 60% con grado óptimo del factor pendiente, se localizan en estas zonas. Para el caso del factor orientación, el 51% se localiza en estas dos zonas. De acuerdo a este análisis, las condiciones topográficas permiten establecer zonas de recuperación, mismas que pueden destinadas al manejo de la regeneración natural (Figura 3).

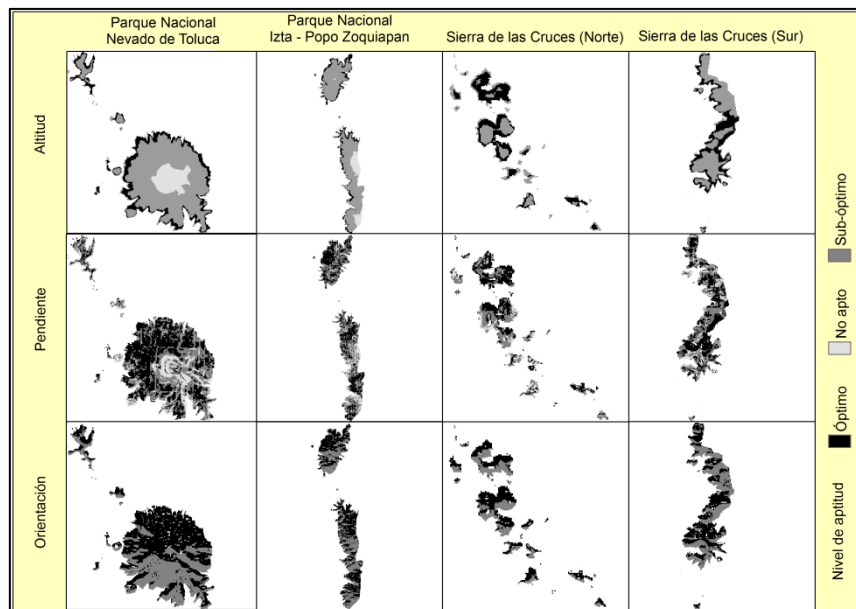


Figura 3. Grados de aptitud del criterio topográfico en la alta montaña del Estado de México.

El análisis de los criterios climáticos, mostró que 22567 ha cuentan con la temperatura óptima, siendo el PNIPZ y PNNT los de mayor superficie, ya que del total, el 74% corresponde a estas zonas. Este mismo comportamiento se presenta en las zonas óptimas del factor precipitación, ya que el 65% y 32% con grado óptimo se localizan en estas áreas (Figura 4).

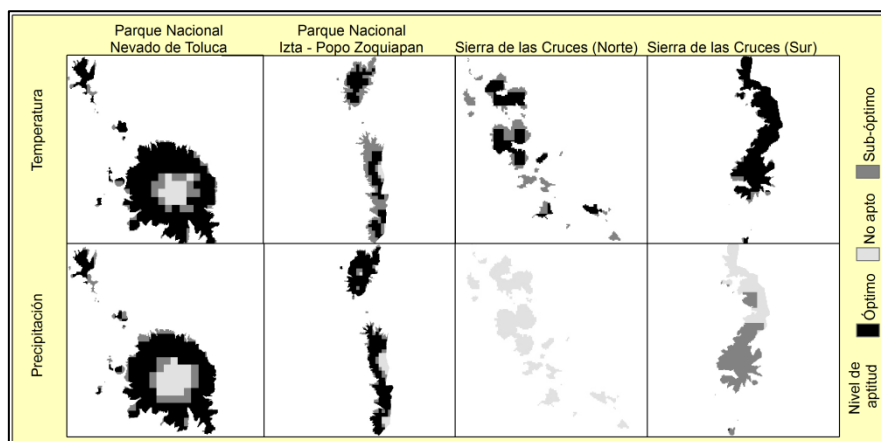


Figura 4. Grados de aptitud de criterio climático en al alta montaña del Estado de México.

Los resultados del grado de aptitud óptimo del factor tipo de suelo, el análisis coincidió con lo planteado por Pineda et al. (2012), ya que las mejores condiciones para realizar actividades forestales, concretamente plantaciones, se localizan en suelos de tipo andosol, siendo el PNNT donde se localizó la mayor superficie (56%) con este tipo de suelo. Por su parte, las zonas con el menor grado de erosión, se localizaron en el PNIPZ con el 66%, mientras que la SC tiene el 4% de su superficie con grado óptimo del factor erosión. Esto se debe principalmente a que la SC no esta integrada como Área Natural Protegida, lo que implica mayor extracción de madera y actividades de pastoreo.

Los resultados del análisis del factor densidad del bosque, mostraron que de las 22648 ha con grado óptimo, el 60% se localiza en el PNIPZ, caso contrario para el PNNT que solo ocupa el 13% con este grado. Estos resultados son lógicos, ya que la ocupación del suelo mostró que los bosques del PNNT son los más fragmentados en la alta montaña (Figura 2). Esto se ve incrementado por problemas de sanidad, extracción selectiva de madera, presencia de agricultura y pastoreo (Franco et al., 2006; Endara et al., 2012), esto ha originado que de las 8614 ha no aptas en la alta montaña, 4311 ha se localizaron en el PNNT.

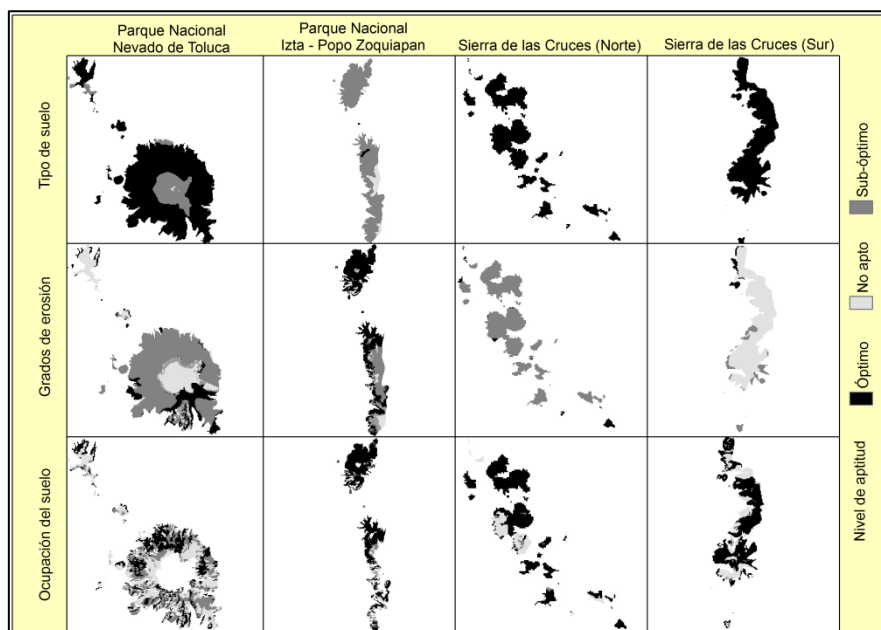


Figura 5. Grados de aptitud de las variables de suelo en la alta montaña del Estado de México.

Estandarizados y normalizados los factores, se realizó la EMC a través de la técnica de comparación por pares (Munier, 2004). Dicho proceso se basó en la consulta de expertos forestales, los cuales ponderaron los factores para obtener los pesos (Cuadro 6). El resultado de la evaluación mostró una razón de consistencia de $0.08 < a < 0.1$, indicando que los resultados son consistentes.

Los expertos forestales consideraron al factor densidad del bosque como el de mayor importancia, debido a que los bosques en condición semidenso y fragmentado son los que requieren recuperar el número de árboles por unidad de superficie. El segundo factor de importancia fue la variable altitud-temperatura, la importancia radica en que medida que se incrementa el gradiente altitudinal y la temperatura descende, las especies forestales van cesando su crecimiento en altura y por consiguiente se van adaptando a nuevas condiciones ambientales extremas.

Cuadro 6. Peso de los factores ambientales.

	A	B	C	D	E	F	G	$\frac{1}{N} \prod_{i=j}^{**} \Pi_{ci}$	$\sqrt[7]{\text{col.2}}$	Peso
A	1	1	2	5	7	8	9	5040.00	3.3800	0.3009
B	1	1	3	5	6	8	9	6480.00	3.5036	0.3119
C	1/2	1/3	1	4	5	7	8	186.67	2.1108	0.1879
D	1/5	1/5	1/4	1	5	8	9	3.60	1.2008	0.1069
E	1/7	1/6	1/5	1/5	1	3	4	0.01	0.5279	0.0470
F	1/8	1/8	1/7	1/8	1/3	1	2	0.00	0.2931	0.0261
G	1/9	1/9	1/8	1/9	1/4	1/2	1	0.00	0.2153	0.0192
									11.231	1.000

A: densidad del bosque, B: altitud-temperatura, C: precipitación, D: tipo de suelo, E: pendiente, F: erosión, G: orientación. **C: criterio, N: Número de criterios

De acuerdo a la EMC, se identificaron 22203 ha con aptitud ambiental, de las cuales 4672 ha tienen un grado muy bajo, 3200 ha con grado bajo, medio 5752 ha, alto 5044 ha y muy alto 4235 ha (Figura 6). Del total con un nivel de adecuación muy alto, el PNNT ocupa el 23%, el PNIPZ con el 20% y SC con el 16%, el resto se distribuye en la Reserva de Biosfera de la Mariposa Monarca y Cerro Jocotitlán. Para el caso del nivel de adecuación muy bajo, el 30% se localiza en la SC, el 22% en el PNIPZ y sólo el 15% en el PNNT. Con este análisis se puede decir que ambientalmente, las mejores condiciones se localizan en las zonas de mayor altitud (PNIPZ y PNNT), sin embargo también son las que están sufriendo el mayor impacto por las actividades antrópicas como la agricultura, el pastoreo y plagas forestales.

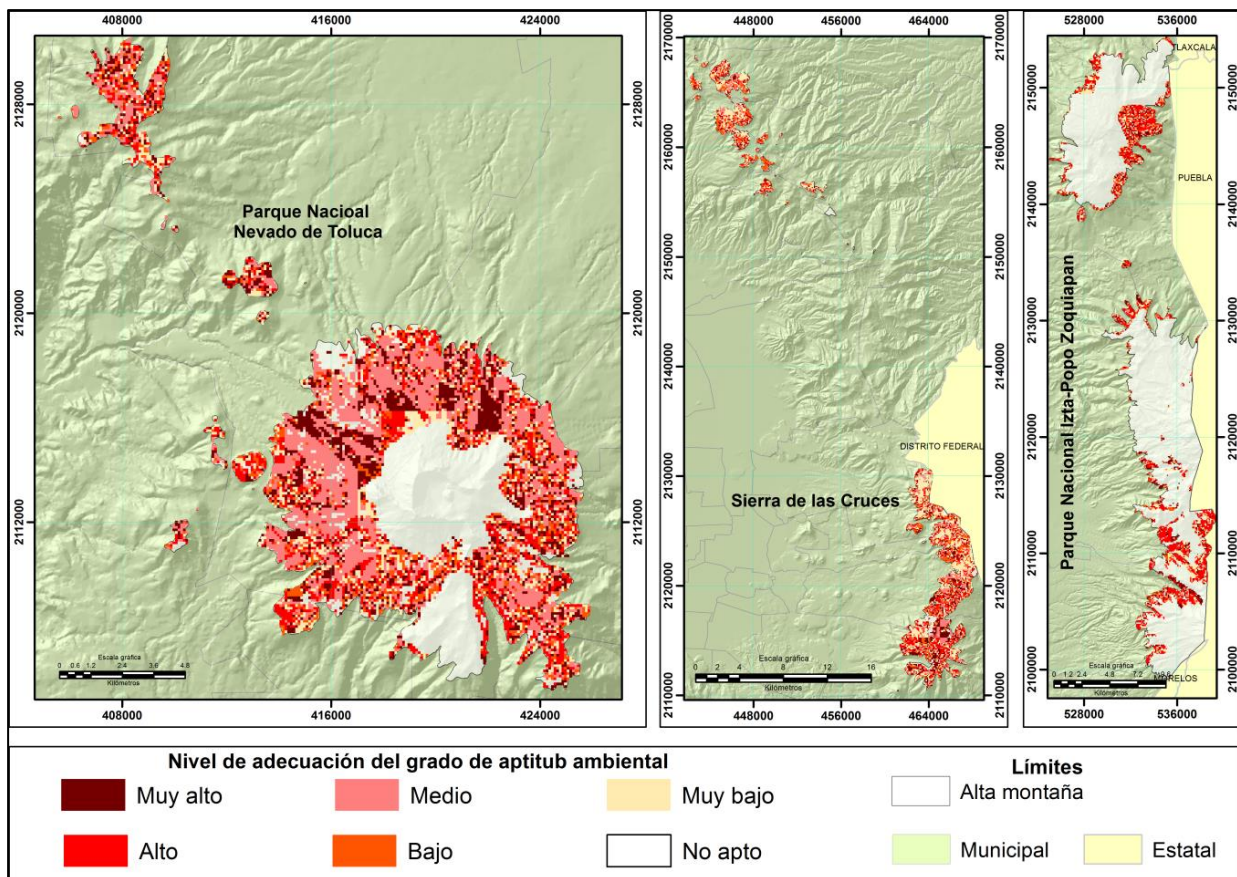


Figura 6. Grado de aptitud ambiental para la recuperación del bosque de alta montaña del Estado de México.

Los resultados difieren en su distribución espacial con lo reportado por Regil y Franco (2009) y López (2011), las diferencias se centran principalmente en el PNNT, por un lado sobre-estiman superficies con un nivel de adecuación alto, y por el otro sub-estima zonas con un nivel alto y muy alto. Por su parte Pineda et al. (2012) muestran que el PNIPZ y PNNT tienen un nivel de adecuación de bajo a muy bajo para plantaciones comerciales. Estas diferencias se deben, por un lado a que los rangos de aptitud que se establecieron difieren con los trabajos antes mencionados, y por otro, la comparación por pares empleada fue totalmente diferente a las empleadas, ya que dichos trabajos no se incluyó la densidad de los bosques.

CONCLUSIONES

El empleo de los SIG y EMC, así como los rangos de distribución generados permitieron ubicar zonas con un grado de aptitud ambiental para la recuperación del bosque de alta montaña del Estado de México, donde las variables densidad del bosque y la relación altitud-temperatura fueron determinantes. Para el primer caso, el análisis muestra que el PNNT es la zona más afectada, a pesar de ello, la EMC mostró que la mayor superficie con un nivel de adecuación muy alto (1987 ha) y alto (1743 ha) se localice en estas áreas. En términos generales, en la alta montaña predominan sitios con nivel de aptitud de alto a muy alto, lo que indica que las especies forestales cuentan con las condiciones ambientales para seguir adaptándose.

Para localizar estas zonas, es preciso contemplar rangos óptimos de los requerimientos ambientales de las especies, los cuales tienen que ser medidos y evaluados en campo, así como homogeneizar los criterios en la ponderación por pares y que estos respondan al objetivo planteado.

El éxito de la recuperación de los bosques dependerá en parte de la localización de los mejores sitios, así como de la elección de la mejor especie que se adapte a dichas condiciones ambientales.

AGRADECIMIENTOS

A CONACYT por la beca de posgrado, también al Instituto de Ciencias Agropecuarias y Rurales (ICAR-UAEMEX), y al proyecto UAEM (3063/2011) por el apoyo brindado para el trabajo de campo.

REFERENCIAS

- Alcalá, J., Rodríguez, J. C., Villar, C., Sosa, M., Heredia, G., & Bolaños, H. (2009). Criterios e indicadores ambientales como estrategia de gestión ambiental en el ordenamiento territorial. *Revista de Ciencias Forestales*, 17(1), 77-87.
- Arriaga, V., Cervantes, V., & Vargas-Mena, A. (1994). *Manual de reforestación con especies nativas: colecta y preservación de semillas, propagación y manejo de plantas*. INE – SEDESOL – UNAM. D. F. México.
- Berlanga, C. A., García, R. R., López, J., & Ruiz, A. (2009). Patrones de coberturas y usos del suelo en la región costa norte de Nayarit (1973-2000). *Revista Investigaciones Geográficas*, (72), 7-22.

- Bobbink, R., Hill, G. W., & Verduyn, B. (2003). Main-induced changes cover in the Iztaccihuatl-Popocatepetl Region. *Revista Ecology and Man in Mexico Central Volcanoes Area. Netherlands*, 49-103.
- Chávez, L. G., Tapia, L. M., Bravo, E. M., Sáenz, R. J. T., Muñoz, F. H. J., Valdez, F. I., Larios, G. A., Renteria, A. J. B., Villaseñor, R. F. J., Sánchez, P. J. L., Alcántar, R. J. J., & Mendoza, C. M. (2012). *Impacto de cambio de uso de suelo forestal a huertos de aguacate*. SAGARPA – INIFAP. Uruapan. México.
- Chuvieco, E. (1996). *Fundamentos de teledetección espacial*. Rialp, S. A. España.
- Comisión Nacional Forestal., & Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (2007). Fichas Técnicas. *conafor.gob.mx* (En línea). México, disponible en: <http://www.conafor.gob.mx/portal/index.php/temasforestales/reforestacion/fichas-tecnicas>.
- Cuervo, A. P., Téllez, O., Venegas, C. S., Gómez, M. A., & Martínez, E. (2011). Desarrollo de superficies climáticas para México de alta resolución: Representando el siglo XX e inicio del siglo XXI. En: Resúmenes de ponencias. XIX Reunión Nacional SELPER-México, Sociedad de Percepción Remota y Sistemas de Información Espacial CIGA-UNAM. Morelia, Michoacán. pp. 87.
- Elvira, J. R. (2008). Programa Institucional 2007–2012. CONAFOR. México. 9p.
- Endara, A. R. (2010). *Análisis de los procesos de recuperación en el bosque templado del Parque Nacional Nevado de Toluca*. Universidad Autónoma del Estado de México. Tesis de doctorado, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, Edo. México, México.
- Endara, A. R., Calderón R., Nava, G., & Franco, S. (2013). Analysis of fragmentation processes in high-mountain forests of the Centre of Mexico. *American Journal of Plant Sciences*, (4), 697-704. Doi: 10.4236.
- Endara, A. R., Franco, S., Nava, G., Valdez, J. I., & fredericksen, T. (2012). Effect of human disturbance on the structure and regeneration in the Nevado de Toluca National Park, México, *Journal of Forestry Research*, 23(1), 39-44. Doi: 10.1007/s11676-012-0226-8.
- Flusser, J., Sroubek, F., & Zitová, B. (2007). Image fusion: principles, methods, and applications. *Institute of Information Theory and Automation Academy of Sciences of the Czech Republic Pod.* 12-14p.
- Franco, S., Regil, H. H., González, C., & Nava, G. (2006). Cambio de suelo y vegetación en el Parque Nacional Nevado de Toluca, México, en el Período 1972-2000 (parte A), *Revista Investigaciones Geográficas*, 061 (1), 28–57.

- García, A. (1998). Geoecología del paisaje vegetal en el occidente de la Ciudad de México. *Revista Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, (18), 115-137.
- INSTITUTO DE INFORMACIÓN E INVESTIGACIÓN GEOGRÁFICA, ESTADÍSTICA Y CATASTRAL. (2010). Espaciomapas, SPOT-5. Toluca, México.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICAS, GEOGRAFÍA E INFORMATICA, (2000). Modelo Digital de Elevación (MDE), Escala 1:250 000. Toluca, México.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICAS, GEOGRAFÍA E INFORMATICA, (2000). Edafología, Escala 1:250 000. Toluca, México.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICAS, GEOGRAFÍA E INFORMATICA, (2009). Grados de erosión, Escala 1:250 000. Toluca, México.
- Killeen, J., Siles, M., Soria, L., & Correa, L. (2005). Estratificación de vegetación y cambio de uso de suelo en los Yungas y Alto Beni de la Paz. *Revista Ecología en Bolivia*, 40(3), 32-69.
- Lamprecht, H. (1990). *Silvicultura en los Trópicos*. GTZ. Berlin, República Federal de Alemania.
- López, J. L. (2011). *Localización de áreas óptimas para la recuperación del bosque de pino en el Estado de México mediante técnicas de Evaluación Multicriterio y Sistemas de Información Geográfica*. Tesis de posgrado, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, Edo. México, México.
- Mena, C., & Montecinos. R. (1996). Comparación de redes neuronales y regresión lineal para estimar productividad de sitio en plantaciones forestales, utilizando geomática. *Revista Bosque*, 27(1), 35–43.
- Munier, N. (2004). *Multicriteria environmental assessment*. Kluwer Academic Publishers. Netherlands.
- Nájera, O., Bojórquez, J. F., Cifuentes, J. L., & Marceleño, S. (2010). Cambio cobertura y uso de suelo en la Cuenca del Río Mololoa, Nayarit. *Revista Bio-Ciencias*, 1(1), 19–29.
- Palomino, J., Barra, M. (2003). *Especies forestales nativas con potencial para reforestación en la provincia de Oxapampa y fichas técnicas de las especies de mayor prioridad*. PRO NATURALEZA.
- Pineda, N. B., Bosque, J., Gómez, M., Franco, R., Antonio, X., & Manzano, L. R. (2012). Determination of optimal zones for forest plantations in the State of México using Multi-Criteria

Spatial Analysis and GIS. *Journal of Geographic Information System*, 4(3), 204–218. Doi: 10.4236.

Ravelo, A., & Abril, E. (2007). Identificación de zonas forestales para pinos en Calamuchita, Córdoba, Argentina. Memorias de la XI Conferencia Iberoamericana de Sistemas de Información Geográfica. Buenos Aires, Argentina, pp. 1-5.

Regil, H. H., Franco, S. (2009). Nivel de adecuación del territorio para el desarrollo de especies forestales y agrícolas en el Parque Nacional Nevado de Toluca (PNNT). *Revista Economía, Sociedad y Territorio*, 9(31), 803-830.

Revolorio, A. J. (1996). *Evaluación de la calidad de sitio para Pinus oocarpa shiede, en la zona de amortiguamiento de la Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas, Guatemala*. Tesis de maestría, Centro Agronómico Tropical y Enseñanza, Guatemala.

Velázquez, A., Mas, F., Díaz, R., Mayorga, R., Alcántara, C., Castro, R., Fernández, T.; Bocco, G., Ezcurra, E.; & PALACIO, J. L. (2002). Patrones y cambios de uso de suelo en México. *Revista Gaceta ecológica*, (062), 21–27.

Villegas, R., Muñoz, C. A., Gallo, C. A., Ponce, J. L. (2011). *Reporte final de tasa de cambio de uso de suelo en el Parque Nacional Pico de Orizaba, Veracruz, México en el periodo 2003-2011*. CONANP, México.

Villers, L., García, L., & López, J. (1998). Evaluación de los bosques templados en México: una aplicación en el parque nacional Nevado de Toluca. *Revista Investigaciones Geográficas*. (36), 7-18.

Wald, L., Ranchin, T., & Magnolini, M. (2009). Fusion of satellite on images spatial resolutions: assessing the quality of resulting images. *Revista Photogrametric Engineering and Remote Sensing, France*, 63(6), 691-699.



7.2 Análisis de la calidad de sitio para la recuperación del bosque de alta montaña del Estado de México

ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE SITIO PARA LA RECUPERACIÓN DEL BOSQUE DE ALTA MONTAÑA DEL ESTADO DE MÉXICO

José Luis López García¹, Angel Rolando Endara Agramont¹, Sergio Franco Maass¹, Jesús Soria Ruiz²

¹Instituto de Ciencias Agropecuarias y Rurales de la UAEM. Carretera Toluca–Atlacomulco Km. 14.5, C.P. 50000 Toluca, México. ²Laboratorio de Geomática, INIFAP. Vial. Adolfo López Mateos Km. 4.5 Carr. Toluca-Zitácuaro, Zinacantepec, Estado de México, C.P. 51350.

Resumen

A pesar de que existe toda una serie de actividades como la reforestación, programas de sanidad forestal, prevención de incendios forestales en la alta montaña, estas actividades no han evidenciado su efectividad. El objetivo de este trabajo es analizar la calidad de sitio para establecer zonas de recuperación del bosque de alta montaña del Estado de México. La metodología propuesta, se centró en analizar variables de calidad de sitio mediante técnicas de Evaluación Multicriterio (EMC) y Sistemas de Información Geográfica (SIG) de las variables: regeneración (R), producción de semilla (PS), espesor de la materia orgánica (EMO), profundidad efectiva del suelo (PES), altura del pastizal (AP), porcentaje de luminosidad (LU), e índice de sitio (IS) que influyen en la recuperación de bosques. Los resultados por factor mostraron 21 sitios con un IS muy alto, 11 sitios con un nivel alto en regeneración, 16 sitios con la producción óptima de semilla, 40 sitios con un grado alto en porcentaje de luminosidad, 30 con las condiciones altas en espesor de la materia orgánica y 8 con la condición alta en altura de pastizal, 39 con un nivel de aptitud alto en la profundidad del suelo. Aplicando la EMC, se obtuvieron 10 sitios con un nivel de adecuación muy alto, 6 con nivel alto, 10 con un nivel medio y 14 con un nivel bajo. De manera general, se concluyó que las mejores condiciones de calidad de sitio se localizan en la Sierra de las Cruces, debido a la presencia de regeneración, árboles semilleros y zonas con el mejor índice de sitio.

Keywords: índice de sitio, regeneración, producción de semilla, luminosidad, materia orgánica, pastizal, profundidad del suelo.

Introducción

El bosque de alta montaña en el Estado de México es una zona con un valor ecológico importante, pues a partir de este sistema se genera la mayor parte de agua para la Zona Metropolitana de la Ciudad de México y el Valle de Toluca, sin embargo en las últimas décadas ha sufrido una reducción considerable en la densidad de su cobertura forestal, especialmente en zonas de bosque de *Pinus hartwegii* Lindl (Endara *et al.*, 2013).

Ante ello, diversas instancias como la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), la Protectora de Bosques del Estado de México (PROBOSQUE), universidades, empresas, Organizaciones no Gubernamentales (ONG'S) y la población local, han realizado campañas de reforestación en estas zonas. De acuerdo con datos de PROBOSQUE, se tiene que en el bosque de alta montaña del año 2008 a 2011 se han reforestado 905 ha, de las cuales 460 ha han sido en el Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan (PNIPZ), 395 ha en el Parque Nacional Nevado de Toluca (PNNT) y 50 ha en la Sierra de las Cruces (SC), sin embargo, de acuerdo a un muestreo de supervivencia, se encontró que en una hectárea reforestada con 3333 árboles, el 23.4% había muerto en la zona de la SC; mientras que en el PNNT, con la misma superficie, el 100% de especies reforestadas no sobrevivieron. En el primer caso, las actividades de pastoreo y la compactación del suelo son la principal causa de la mortalidad; mientras que el segundo, la posible causa es la presencia de plagas como el *Dendroctonus adjunctus*. Endara (2010) reporta que en poblaciones de *P. hartwegii* Lindl del PNNT existen aproximadamente 209 ha altamente infestada por este tipo de plaga.

Además de los problemas antes mencionados, ya se han identificado otra serie de problemas que presentan los bosques de alta montaña, como la fragmentación, cambios de uso de suelo, plagas forestales (Bobbink *et al.*, 2003; Franco *et al.*, 2006; Regil *et al.*, 2009; Endara *et al.*, 2013), han planteado recomendaciones, como la reforestación, programas de sanidad, prevención de incendios; sin embargo, dadas las condiciones ambientales, costo y adaptación para que se establezca una plantación, los resultados no han sido muy favorables para la recuperación del bosque. Ante este panorama, una posible solución es la identificación de áreas con aptitud forestal. En el presente artículo se emplean variables de calidad de sitio enfocadas a la conservación forestal.

La importancia de conocer la calidad de sitio, es porque cada especie requiere de una serie de condiciones ambientales y dasonómicas (Revolorio, 1996) que le permiten su adaptación y crecimiento. (Finegan, 1994; Kramer y Akca, 1995) definen a la calidad de sitio como la capacidad potencial de un sitio para sostener una producción de madera de una especie o tipo de bosque, y puede ser estudiado mediante métodos directos e indirectos (Clautter *et al.*, 1983) o través de variables del rodal y factores ambientales (Vicent, 1975; Hägglund, 1981).

Aunque la calidad de sitio en áreas forestales se ha utilizado para la predicción y simulación en el manejo intensivo de los bosques; en el presente trabajo se enfocó más hacia la conservación del bosque, siendo el IS uno de los métodos que permite conocer la dinámica de crecimiento y productividad de un bosque, ya que relaciona altura de los árboles dominantes con una edad base (Stiff *et al.*, 1991). Trabajos como los de (Revolorio, 1996; Brosovich, 1998; Esse *et al.*, 2007;

Ivancich *et al.*, 2011) construyeron curvas de IS basadas en el modelo de Chapman-Richards justificando que representa mejor la curvas, sin embargo (Revolorio, 1996 y Atárola, 2011) utilizan el modelo de Schumacher, como el modelo que mejor representa el IS, además de que permite establecer niveles de IS en bosques de lento crecimiento.

En México se ha utilizado el IS para especies del genero *Pinus* más importantes desde el punto de vista comercial, utilizando alturas de los árboles dominantes y codominantes a una edad base de 100 años para las especies de lento crecimiento (Musálem, 1977; Rodríguez, 1980), y 50 años para las de rápido crecimiento (Orantes, 1980; Maldonado, 1984).

Como se puede ver, los trabajos antes citados, se ha empleado la calidad de sitio para el aprovechamiento forestal (Revolorio, 1996; Atárola, 2001). El presente estudio busca que a partir del análisis de variables de calidad de sitio se puedan identificar zonas con aptitud para establecer zonas de recuperación del bosque, para ello se plantearon los siguientes criterios: espacios que cumplan con las condiciones de regeneración, terrenos con evidencia de producción de semilla, sitios con las condiciones de vegetación arbustiva que permita el crecimiento de la especie forestal y espacios con un índice de sitio que permita establecer zonas de recuperación.

El empleo de técnicas EMC se ha aplicado principalmente para obtener zonas de adecuación del territorio. En el campo forestal existen trabajos como los de (Regil *et al.*, 2009; Pineda *et al.*, 2012) donde las han aplicado para obtener un nivel de adecuación para plantaciones forestales, sin embargo se han aplicado a variables ambientales, por lo que resulta importante aplicarlo a variables dasonómicas.

Métodos

La zona de alta montaña en el Estado de México se localiza a partir a los 3500 msnm, tiene una superficie de 45105 ha, lo integran principalmente los municipios de Zinacantepec, Toluca, Tenango del Valle (PNNT); Ocoyoacac, Tianguistenco, Xalatlaco (SC); Amecameca, Tlalmanalco y Atlautla (PNIPZ) (Figura 1). La superficie de bosque es de 34520 ha, se encuentran distribuidos hasta los 4100 msnm, dominados principalmente por *Pinus hartwegii* Lindl, aunque también se pueden encontrar individuos a los 4400 msnm. Esto lo constituye como unos de los bosques que mejor se ha adaptado a las condiciones ambientales extremas (Endara *et al.*, 2013). De acuerdo con un trabajo previo, se encontró que ambientalmente, 22303 ha de bosque de alta montaña del Estado de México tienen aptitud para establecer zonas de recuperación.

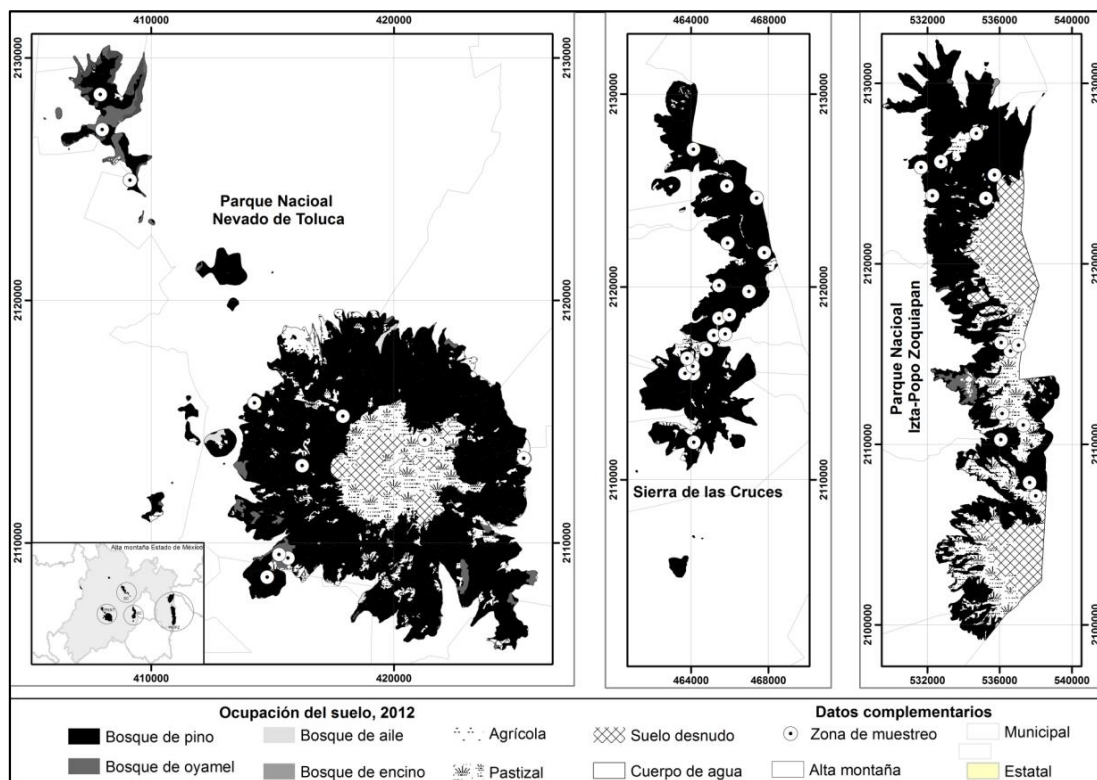


Figura 1. Localización del bosque de alta montaña en el Estado de México.

La toma de datos sobre calidad de sitio fue de acuerdo a lo recomendado por Revolorio (1996), los cuales se dividieron en factores externos y factores internos. La obtención de datos fue a partir de 42 parcelas temporales de 20 m x 20 m de forma heterogénea. Los factores externos como la PES, EMO, AP, LU fueron obtenidos en cinco puntos de la parcela.

Los factores internos son aquellos referidos a variables del rodal, para ello se levantó información sobre estructura y regeneración de acuerdo a las categorías utilizadas por Valdez (2002) (Cuadro 1). La estructura se agrupo en clases diamétricas de 5 cm, la estructura horizontal permitió determinar si el bosque es coetáneo o disetáneo (Ribeiro *et al.*, 2002) citado por Endara *et al.* (2010); mientras que la estructura vertical permitió caracterizar las alturas de los árboles en dominantes, codominantes, intermedios, suprimidos (Steubin *et al.*, 2001). En este caso, la estructura horizontal se utilizó para conocer la distribución de los individuos en diferentes categorías diamétricas, y la estructura vertical permitió definir los estratos arbóreos presentes en el bosque de alta montaña.

Cuadro 1. Clasificación de la regeneración del bosque

Clase	Tamaño
Plántula	> a 30 cm de altura
Brinzal	$\geq 0.3 < 1.5$ m de altura
Latizal	≥ 1.5 m altura < 2.5 cm DAP
Fustal	≥ 2.5 DAP

Se identificaron 18 sitios que cumplen con las condiciones de árbol semillero (Márquez *et al.*, 2009); es decir aquellos con más del 40% de copa viva, sin bifurcaciones, sin indicios de plagas

o incendios forestales, así como los más representativos en altura total (AT) y diámetro a la altura de pecho (DAP). Además, para realizar el IS, se seleccionaron los dos árboles más representativos de cada sitio y que cumplieran con las condiciones establecidas por (Castaños, 1962; Stiff *et al.*, 1991). Con el objetivo de identificar datos atípicos que puedan sesgar los resultados de la curva guía con la ecuación de Schumacher (ecuación 1) y Chapman-Richards a una edad base de 72 años (ecuación 2, se graficó la relación AT y la edad a la altura de pecho (Figura 2).

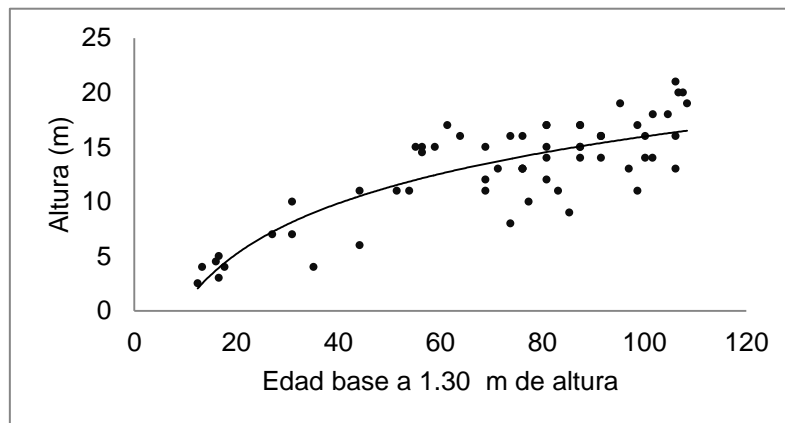


Figura 2. Dispersión de los datos edad-altura en el bosque de alta montaña

$$S = \beta_0 e^{(-B_1 \frac{1}{E_1})} \quad (\text{ecuación 1 y 1}^a) \quad H = S e^{-B_1 (\frac{1}{E_1} - \frac{1}{E_0})}$$

Donde:

S = Parámetro dependiente del sitio.
 β_0 = Parámetro de valor asintótico.
 B_1 = Parámetro de la tasa de cambio.
 e = Base de logaritmos naturales.
 E = Edad (años)
 H = Altura de los árboles dominantes y

$$S = \beta_0 \left[1 - e^{(-B_1 * E_0)^{B_2}} \right] \quad H = S \left[\frac{1 - e^{-B_1 E_1}}{1 - e^{-B_1 E_0}} \right] \quad (\text{Ecuación 2 y 2}^a)$$

Donde:

S = Parámetro dependiente del sitio.
 B_1 = Parámetro de valor asintótico.
 B_2 = Parámetro de la tasa de cambio.
 B_3 = Parámetro de forma.
 e = Base de logaritmos naturales.
 E = Edad (años)
 H = Altura de los árboles dominantes y codominantes (m).

Análisis de la información de las variables de calidad de sitio

Una vez obtenidos los datos, se realizó el análisis de la información mediante las técnicas EMC y SIG de los factores establecidos, estos fueron normalizados en el SIG Idrisi Selva mediante la función borrosa (*Monotonically increasing sigmoidal fuzzy function*).

Los grados de aptitud para el factor R y PS, se establecieron con base a datos de medias y DS (Cuadro 3). De acuerdo a la estadística, para el factor regeneración se obtuvo una media de 37 árboles/400 m² con una DS de 47 árboles/400 m². Para el factor producción de semilla se generó una media de 136 conos con una DS de 99 conos. Finalmente, el radio de consistencia para la regeneración fue de 0.02 y para el factor producción de semilla de 0.03. Para la profundidad

efectiva del suelo, los rangos fueron establecidos con base a Arriaga *et al.*, (1994), donde se obtuvo una profundidad mínima de 21 cm y una máxima de 100 cm con una media de 82.9 cm. El radio de consistencia de la ponderación de este factor fue de 0.03.

Los grados de aptitud para el factor espesor de la materia orgánica, fueron establecidos de acuerdo a lo planteado por Centeno y Ruiz (1993) citado por Estrada (1997), el radio de consistencia de los grados ponderados fue de 0.04. Para la variable altura del pastizal, como primer paso, se clasificaron en clases de altura de 5 cm dando como resultado 16 clases, posteriormente se graficó la relación clase de altura de pastizal/No. Árboles con DAP > 2.5 cm, donde a pesar de contar con datos dispersos se identificó que las clases 7, 9 y 10 es donde se presenta mayor número de árboles/ha; mientras que las clases de 1 a la 6 mostraron un comportamiento heterogéneo por lo que se decidió definir estas clases como sub-óptimas, y las clases de la 11 a 16 presentan el menor número de individuos (Figura 3). A partir de estos valores se establecieron los rangos de aptitud, los cuales tienen un radio de consistencia de 0.03 (Cuadro 3).

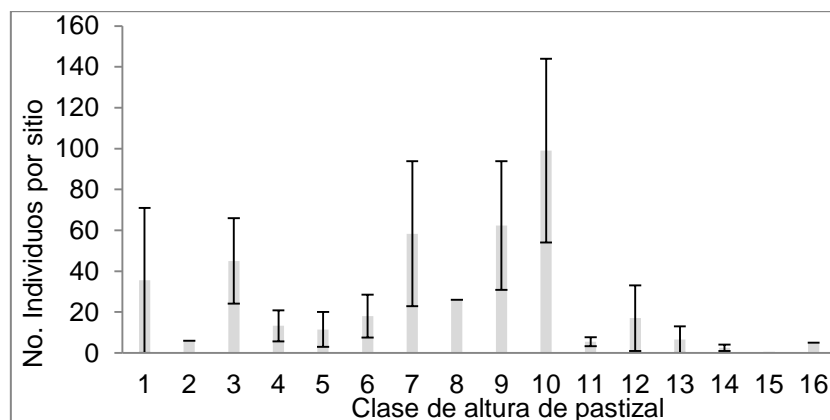


Figura 3. Relación clase de altura de pastizal/número árboles

Los rangos del factor luminosidad fueron establecidos de acuerdo a lo planteado por (Willan, 1984 y Alejano, 2003), donde se identificó una mínima de 33%, una media de 79%, y una máxima de 100%, los rangos establecidos tienen un radio de consistencia de 0.03 (Cuadro 3).

Por otra parte aplicando los dos métodos para obtener el IS, se identificó que el modelo de Schumacher se ajusta mejor que el de Chapman-Richard (Cuadro 2). Ajustado el modelo de Schumacher (ecuación 1a) se generó el IS promedio para cada parcela. Posteriormente se realizó un análisis de correlación bivariado Pearson con las variables del rodal: altura dominante, área basal (ecuación 3), altura promedio, número de árboles/ha.

$$G = \sum d_i^2 * 0.7854$$

(Ecuación 3). Donde: G = área basal/parcela (m²)

d_i = DAP de cada árbol individual de la parcela

Los rangos de aptitud fueron establecidos a partir de los datos de la media (13.11 m) y la desviación estándar (4.84 m) (Cuadro 3).

Cuadro 2. Modelos probados para obtener el IS de los bosques de alta montaña del Estado de México

MODELOS	EMC	Estimadores	Nivel de confianza
Schumacher	406.5822	$\beta_0= 21.5086$ $\beta_0=30.8537$	95%
Chapman-Richard	1265.935	$\beta_0= 13.0323$ $\beta_1=1.9900$ $\beta_1=1.04$	95%

Cuadro 3. Grado de aptitud de factores internos y externos para determinar la calidad de sitio

Factor	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto	Radio de consistencia
R	Rango (No. Individuos) pesos	*	1-95	95-236		0.02
PS	Rango (No. Conos) pesos	*	1-136	>136		0.03
PES	Rango (cm) pesos	<20	21-30	>30		0.03
EMO	Rango (cm) pesos	<1	>5	1-5		0.04
AP	Rango pesos	>50	1-45	45.1-50		0.06
LU	Rango (%) pesos	<33	33-40	>40		0.02
IS	Rango (m) pesos	*	0.0-3.5	3.5-8.3	8.3-13.1 >13.1	0.02

Las restricciones consideradas en este análisis son aquellos sitios con presencia de plagas forestales como *Arceuthobium globosum* y *A. vaginatum* o *Dendroctonus adjunctus*, los cuales fueron reclasificados con el valor de 0; mientras que el valor 1 fue asignado para aquellos candidatos para establecer zonas de recuperación.

Considerando los grados de aptitud por factor, se compararon las tres zonas de muestreo: PNIPZ, PNNT y SC, los cuales se realizaron a partir de la Chi cuadrada (X^2) (Ecuación 4).

Ecuación (4), Donde:
 X^2 = Chi cuadrada
 O_i = Frecuencia observada o empírica
 E_i = $(n \cdot \pi_i)$, donde n es el tamaño de la muestra y π_i la probabilidad de i-ésimo de valor intervalo de valores según la hipótesis
 k = $k-1$ grados de libertad

$$X^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}$$

Una vez normalizados los factores, se ponderaron mediante el método de comparación por pares (Saaty, 1980; Munier, 2004), en el que se comparó la importancia de uno sobre los demás (a_{ij}), posteriormente se determinó el eigenvector principal, el cual establece los pesos (w_{ij}) y el eigenvalor que proporciona una medida cualitativa de la consistencia de los juicios de valor entre pares de factores.

Resultados y Discusión

En el bosque de alta montaña del Estado de México existen sitios que cumplen con la calidad de sitio para establecer zonas de recuperación del bosque. Cabe destacar que no todos los sistemas montañosos del bosque de alta montaña del Estado de México tienen las mismas condiciones de calidad de sitio, sin embargo, el análisis de la X^2 mostró que no existen diferencias significativas ($p > 0.05$) en la mayoría de las zonas de muestreo a nivel de grado de aptitud.

Cuadro 5. Comportamiento de los grados de aptitud por factor.

Variable	Zona	muy alto	alto	medio	bajo	muy bajo	X^2
R	PNIPZ		3	7	4		1.86
	PNNT		2	8	1		7.82
	SC		6	9	2		4.35
PS	PNIPZ		6	1	7		4.43
	PNNT		3	0	8		8.91
	SC		7	1	9		6.12
EMO	PNIPZ		11	3	0		13.86
	PNNT		8	3	0		8.91
	SC		11	5	1		8.94
PES	PNIPZ		13	1	0		22.43
	PNNT		9	2	0		12.18
	SC		17	0	0		34.00
AP	PNIPZ		4	1	9		7.00
	PNNT		1	7	3		5.09
	SC		3	14	0		19.18
LU	PNIPZ		12	2	0		17.71
	PNNT		11	0	0		22
	SC		17	0	0		34
IS	PNIPZ	5	2	2	0	5	7.76
	PNNT	6	1	0	0	4	10.79
	SC	10	3	1	1	2	14.63

Regeneración

La densidad de arbolado fue de 746 individuos/ha con $DAP \geq 2.5$ cm, siendo las clases diamétricas 5-30, donde se presenta la mayor densidad con 107 individuos/ha. En términos de la regeneración, los resultados mostraron un comportamiento similar al reportado por Endara *et al.*, (2012), ya que en el presente estudio se reportaron 757 individuos (Figura 4), hay una diferencia de más 7 individuos, siendo en la categoría de brinzales donde se encontró la mayor densidad. Los resultados de estructura vertical varían con lo reportado con Endara *et al.* (2012) donde reportan que no existen diferencias significativas entre las clases 5-10, 15-30, y las mayores a 35 cm de DAP del bosque de *Pinus hartwegii* del Parque Nacional Nevado de Toluca (PNNT), en este sentido, las clases diamétricas obtenidas muestran diferencias significativas ($p < 0.05$) excepto en la clase 40-45 (Figura 4).

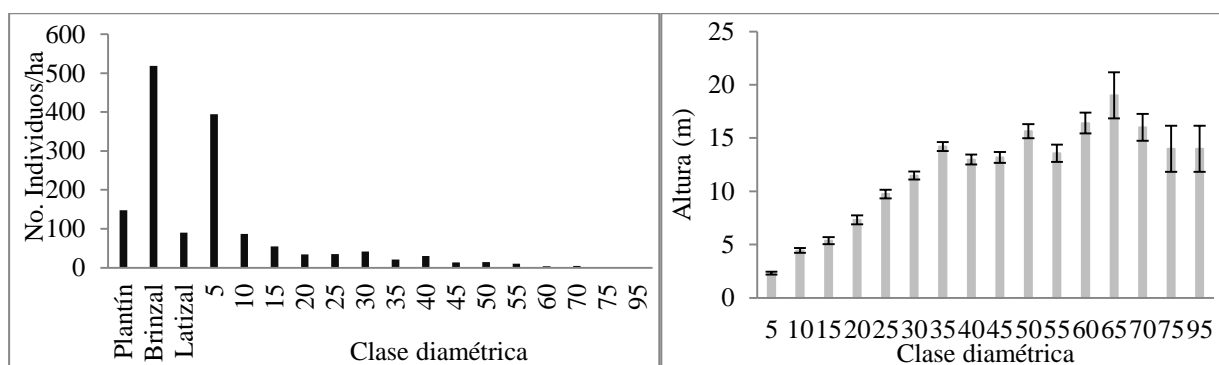


Figura 4. Estructura horizontal y vertical en el bosque de alta montaña del Estado de México

De acuerdo al análisis de X^2 , se observó que sólo en el PNNT hay una probabilidad de 95% de localizar sitios de regeneración con un nivel medio de aptitud, mientras que en el PNIPZ y SC presentaron diferencias significativas ($p < 0.05$); es decir que pueden localizar sitios de regeneración con diferente nivel de aptitud (Cuadro 5).

Producción de semilla

Debido a que se trata de especies de lento crecimiento, los árboles seleccionados como semilleros mostraron datos dasométricos heterogéneos; sin embargo en árboles con edad mayor a los 68 años se presentó mayor producción de conos (Cuadro 6).

Cuadro 6. Estadísticos de la producción de semilla en la alta montaña del Estado de México

	DAP (cm)	AT (m)	DC (m)	EDAD_AP (años)	No. Conos
Media	48.4	16.4	6.6	68.3	136.4
Desviación estándar	14.3	3.7	1.8	19.1	99.5
mínimo	30.0	8.0	4.0	34.0	15.0
máximo	79.0	25.0	12.0	119.0	335.0
Nivel de confianza (95.0%)	7.1	1.9	0.9	9.8	49.5

Los grados de aptitud en el PNIPZ presentan diferencias significativas ($p < 0.05$), por su parte, los grados de aptitud en el PNNT y SC, no presentan diferencias significativas ($p > 0.05$) principalmente en el nivel de aptitud bajo (Cuadro 5).

Profundidad de efectiva del suelo

La profundidad del suelo en los bosques de alta montaña del estado, predominan aquellos con una profundidad > 30 cm, lo cual queda demostrado con el análisis de la X^2 , ya que los tres sitios no mostraron diferencias significativas ($p > 0.05$) y tienen una tendencia hacia el grado de aptitud alto, siendo la SC donde todos los sitios tienden hacia un grado alto, esto se debe principalmente a que se trata de pendientes de 5° a 12° es decir, funcionan como zona de acumulación de suelo, contrario a las zonas del PNIPZ y PNNT que se caracterizan por pendientes pronunciadas

Espesor de la materia orgánica

Los grados de aptitud del espesor de la materia orgánica (EMO), las tres zonas no presentan diferencias significativas ($p > 0.05$), es decir, que en el bosque de alta montaña podemos localizar zonas 1-5 cm de EMO. Las mejores condiciones de regeneración se presentaron con EMO > 1 cm, Donés (1997) citado por Alejano (2003) identificó que en *Pinus sylvestris*, las mejores condiciones de regeneración se presentaron en zonas con espesor de 0.67-9.67 cm.

Altura del pastizal

Los resultados analizados a través de la X^2 no mostraron diferencias significativas ($p > 0.05$) entre los grados de aptitud de PNIPZ y SC, caso contrario ocurre en el PNNT. De acuerdo con los valores (X^2) con dos grados de libertad y un nivel de probabilidad 0.05, en el PNNT existen diferencias significativas entre los grados de aptitud (Cuadro 5).

Porcentaje de luminosidad

Donés *et al.* (1997) citado por Alejano (2003) afirma que la regeneración del *Pinus sylvestris* está relacionado con la existencia de huecos en zona de bosque; es decir entre más huecos mayor cantidad de luz y por tanto mayor será el número de individuos de regeneración. En los sitios muestreados, el 95.2 % se localizan en zonas con un grado óptimo. En este caso, las tres zonas no tienen diferencias significativas ($p > 0.05$), es decir que la mayoría de los sitios contaron con un nivel de aptitud alto.

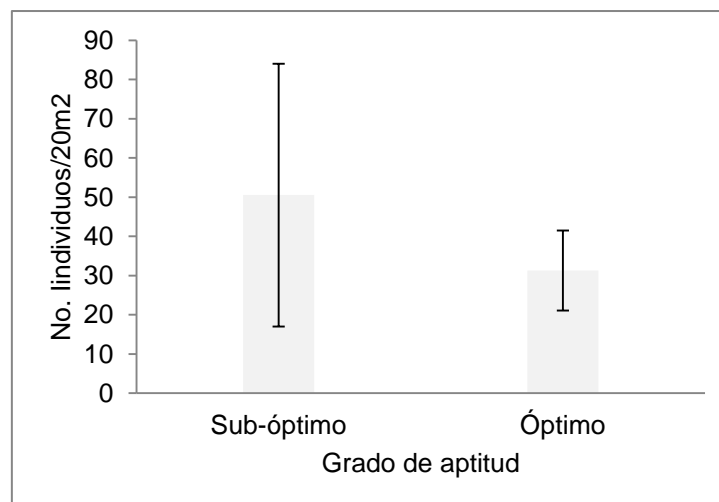


Figura 5. Relación grado de aptitud del factor %luminosidad/No. Individuos en la alta montaña del Estado de México

Índice de sitio

Aplicando el IS mediante la ecuación de Schumacher a una edad base de 72 años, se obtuvo un promedio de 13 m con una máxima de 18.65 m. En este sentido Revolorio (1996) identificó que en *Pinus oocarpa* a una edad base de 25 años, el índice de sitio promedio es de 18.8 m, sin

embargo es una especie que se distribuye de los 2000 msnm a los 2800 msnm, lo cual le permite mayor crecimiento (Stylus y Huhges, 1989) citado por Revolorio (1996). Por su parte Brosovich (1998), a una edad base de 50 años y aplicando la ecuación de Chapman-Richard, obtuvo un IS promedio de 24 m para *Pinus patula Chl. et Cham.* A pesar de que los resultados de esta investigación difieren con los trabajos aquí citados, encuentra justificación ya que se trata de una especie adaptada a altitudes superiores a las reportadas para otras especies de pino.

Respecto del IS y al número de individuos, se encontró una correlación muy baja; esto significa que el IS no influye directamente con la recuperación del bosque de alta montaña pero sí en la altura dominante y área basal (Cuadro 7). Resultados similares se obtuvieron en los estudios de Revolorio (1996) para *Pinus oocarpa* donde encontró una relación positiva entre el índice de sitio y área basal pero no en el número de árboles/ha, además encontró densidades de 120-140 árboles/ha, mientras que en el presente estudio, el número de individuos fue más bajo con 25 árboles/ha, los cuales tienen una altura promedio de 9 m con un DAP de 20.1 cm.

De acuerdo con el análisis de la X^2 , se observó que la zona del PNNT y SC no tienen diferencias significativas ($p > 0.05$), mientras que para el caso del PNIPZ muestra diferencias significativas ($p < 0.05$), es decir existen sitios extremos (Cuadro 5).

Cuadro 7. Relación de la X^2 con IS/Variables del rodal de los bosques de la alta montaña

Variable del rodal	Valor r	Nivel de probabilidad
Altura dominante	0.45	0.05
Área basal	0.42	0.05
Altura promedio	0.34	0.05
Número de árboles/ha	0.14	0.05

El resultado del análisis de comparación por pares (Saaty, 1980) mediante los juicios de expertos forestales, mostró inconsistencias (radio de consistencia), por lo que se decidió utilizar únicamente las respuestas de cinco expertos que mostraron consistencia en el proceso con un radio de consistencia de 0.03. Resultado de ello, se determinó que el criterio más importante fuera el IS, porque la altura que alcanzan los árboles dominantes a una determinada edad base refleja el establecimiento de un rodal (Stiff *et al.*, 1991). En segundo lugar se consideró el factor R porque implica que un sitio tiene el potencial para el desarrollo de arbolado juvenil, es decir, mientras otros individuos de mayor DAP van muriendo de manera natural, otros germinan y se establecen para repoblar el suelo forestal (Harper, 1977), por ello, la producción de semilla fue considerada como el tercer factor de importancia.

De los factores externos, el porcentaje de luminosidad fue considerado como el más importante, debido a que propicia condiciones naturales para el brote de semilla y crecimiento de la plántula, y así establecer la repoblación (Chacon *et al.*, 1998). En quinto lugar fue establecido el factor

espesor de la materia orgánica debido a que en toda la alta montaña, el espesor puede variar de 1 a 5 cm, el cual es el óptimo para la germinación de semilla (Centeno y Ruiz, 1993) citado por Estrada (1997). Aunque no se identificó una relación directa entre la regeneración y la altura del pastizal, este factor fue jerarquizado antes que la profundidad del suelo, debido a que, la presencia de pastizal evitara el acarreo de semilla por el viento o corrientes de agua, mientras que la profundidad del suelo es homogéneo en la alta montaña; es decir cumple con la recomendación realizada por (Arriaga *et al.*, 1994) (Cuadro 8).

Cuadro 8. Ponderación de factores de calidad de sitio de la alta montaña del Estado de México

	IS	R	PS	LU	EMO	AP	PES	$\prod_{i=j}^7 \Pi_{ci}$	$\sqrt[7]{\text{col.2}}$	peso
IS	1	1	2	3	5	7	9	1890	2.9381	0.2964
R	1	1	1	1	3	5	9	135	2.0153	0.2033
PS	1/2	1	1	1	5	7	8	140	2.0258	0.2043
LU	1/3	1	1	1	3	5	9	45	1.7226	0.1738
EMO	1/5	1/3	1/5	1/3	1	2	5	0	0.6410	0.0647
AP	1/7	1/5	1/7	1/5	1/2	1	2	0	0.3621	0.0365
PES	1/9	1/9	1/8	1/9	1/5	1/2	1	0	0.2085	0.0210
								2210	9.9133	1.0000

Aplicando el nivel de adecuación con cinco clases, se obtuvo una media 150.15 con una DS de 84.42, cada clase fue de 50.8: el nivel muy bajo (1-50.8), bajo (50.9-102.6), medio (102.7-153.3), alto (153.4-204.1) y muy alto (204.2-255), mostrando una distribución espacial como se indica en la figura 6. Con base en la distribución espacial, la SC es la zona donde se localizan las mejores condiciones de calidad de sitio para la recuperación del bosque de alta montaña del Estado de México, sin embargo de acuerdo al análisis de X^2 con un nivel de $p < 0.05$, los grados de aptitud no mostraron diferencias significativas ($p > 0.05$), no obstante, el análisis indica que los tres sitios cuentan con las condiciones de calidad de sitio para establecer dichas zonas.

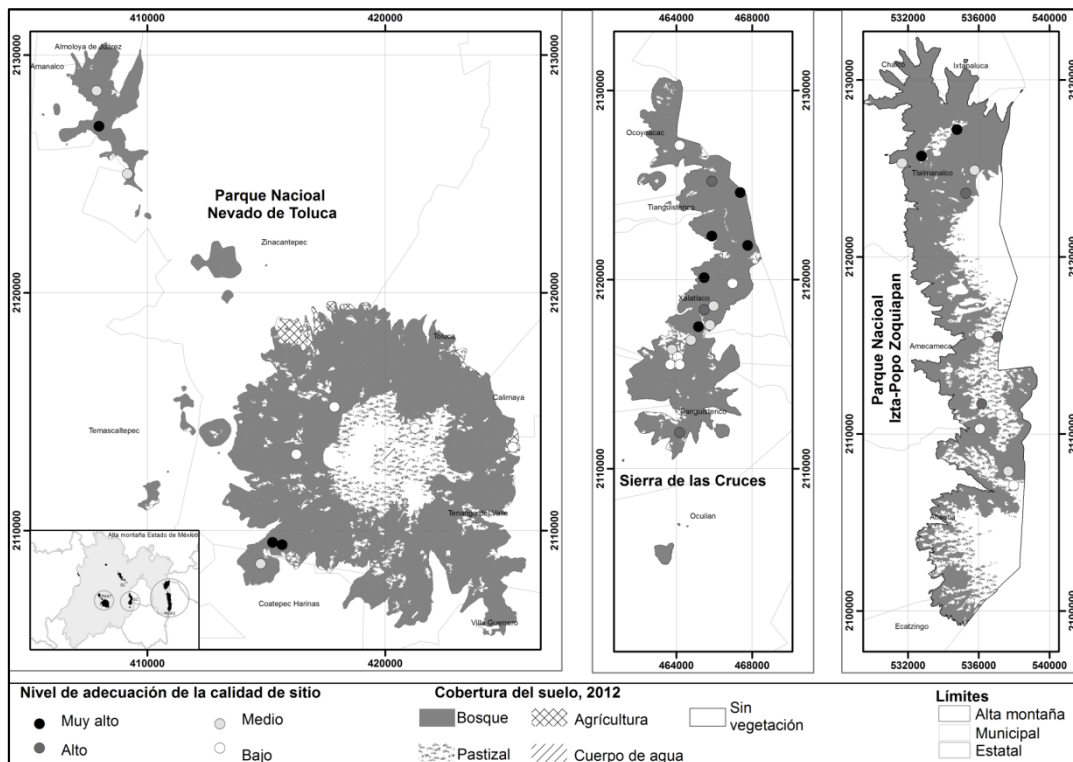


Figura 6. Nivel de adecuación de la calidad de sitio del bosque de alta montaña del Estado de México

Este estudio demostró que acuerdo a la estructura horizontal, la abundancia de la regeneración tiene el mismo comportamiento al reportado por Endara *et al.*, (2012), sin embargo para las clases con DAP > 2.5 cm se presentó una diferencia de 410 individuos/ha más, además de ello, los arboles que predominan en estos rangos altitudinales no superan los 16 m de altura contrario a lo obtenido por Endara *et al.* (2012) y Villers *et al.* (1998) obtienen 24 m altura con DAP>35, y 21 m de altura. Este comportamiento se debe principalmente a la variación altitudinal pues a medida que aumenta la altitud, estas especies van cesando su crecimiento en altura (Spurr y Burtonv, 1982).

A pesar de lo antes mencionado, en el bosque existen espacios que cumplen con las condiciones de calidad de sitio para la recuperación del bosque, ya que se presentan espacios con la producción de semilla, misma que pueden ser utilizada para establecer áreas semilleras, rodal semillero, huerto semillero (Márquez *et al.*, 2009) de *Pinus hartwegii* Lindl, dado que es la especie más representativa y la que mejor se ha adaptado a las condiciones ambientales extremas.

Conclusiones

La identificación de zonas que cumplen con la calidad de sitio constituye una nueva de metodología para seleccionar zonas con el potencial, no sólo con la aptitud ambiental, sino con variables del rodal, de tal forma que la selección de las mismas permita a mediano y largo plazo la repoblación del bosque, ya sea de manera natural o inducida.

De acuerdo al análisis de la X^2 , las tres zonas de muestreo no presentaron diferencias significativas ($p > 0.05$), lo que indica que las tres zonas tienen condiciones similares de calidad de sitio para la recuperación del bosque de alta montaña del Estado de México; sin embargo, con base a la distribución espacial, la Sierra de las Cruces se caracterizó por contar con el mayor número de sitios óptimos.

Referencias

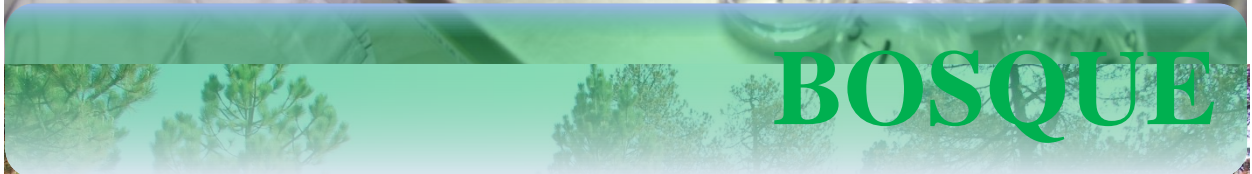
- Alejano, R. M. 2003. La regeneración de pinares mediterráneos naturales con especial referencia a *Pinus nigra* ssp. *Salzmannii*. Cien. For: 15:77-97.
- Arriaga, V., V. Cervantes., A. Vargas. 1994. Manual detallado de reforestación con especies nativas: colecta y preservación de semillas, propagación y manejo de plantas. Editorial Instituto Nacional de Ecología. México. 8p.
- Atárola, E., L. Freltas., C. Linares., J. Baluarte. 2001. Estimación de la calidad de sitio mediante “índices de sitio” para *Cedrelinga catenaeformis* Ducke (Tornillo) en plantaciones de Jenero Herrera, Loreto (Perú). Folia amazónica 12(1-2): 39-51.
- Bobbink, R., G. W. Haill. & B. Verduyn. 2003. Man-induced changes in vegetation cover in the Iztaccihualtl-Popocatepetl Region. Ecology and Man in Mexico Central Volcanoes Area. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands: 49-103.
- Brosovich, G. M. M. 1998. Determinación de la densidad de *Pinus patula* Schl. et Cham., en la región de Zacualtipan, hidalgo, México. Tesis (maestría) Colegio de Postgraduados, Texcoco, México: 41-48.
- Castaño, M. 1962. Evaluación de la calidad de estación de *Pinus patula*, en el norte Oaxaca, Secretaria de Agricultura y Ganaderia, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, México, Boletín técnico No. 2:32.
- Chacón, S.J.M., A. Velásquez M., M.A. Musálem. 1998. Comportamiento de la repoblación natural de *Pinus arizonica* Engelm. bajo diferentes coberturas. Madera y Bosques 4 (2): 39-44.
- Clutter, J.L, J. C. Fortson., L. V. Pienaar., G. H. Brister. & R. L. Bayley. 1983. Timber management a quantitative approach. Wiley, New York: 333.
- Endara, A. A. R. 2010. Análisis de los procesos de recuperación en el bosque templado del Parque Nacional Nevado de Toluca. Tesis (Doctorado). Universidad Autónoma del Estado de México, México: 75-86.
- Endara, A. A. R., M. S. Fanco., B. G. Bernal., H. J. I. Váldez & S. T. Fredericksen. 2012. Effect of human disturbance on the structure and regeneration of forest in the Nevado de Toluca National Park, Mexico. Journal of Forestry Research 23(1):3944.

- Endara, A. A. R., C. R. Calderón., B. G. Nava. & M. S. Franco. 2013. Analysis of fragmentation processes in high-mountain forests of the center of Mexico. *American Journal of Plant Sciences* (prensa).
- Esse, R. C., O. C. Navarro & C. J. Pinares. 2007. Curvas de índice de sitio para *Nothofagus dombeyi* en la zona preandina, provincia de Cautín, IX Región, Chile. *Bosque* 28(2): 142-151.
- Finegan, B. 1954. Introducción a la ecología del crecimiento y rendimiento de los árboles. Tesis (maestría) CATIE, Turrialba, Costa Rica: 10.
- Estrada, C. 1997 *Evaluación de la regeneración natural en bosques de pino de la ECODEFO No. 4 de Durango, México*. Tesis (maestría). Linares, Nuevo León. Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Forestales.
- Franco, M. S., H. H. Regil & J. A. B. Ordoñez. 2006. Dinámica de perturbación-recuperación de las zonas forestales en el Parque Nacional Nevado de Toluca. *Madera y Bosques* 12 (1):1 17-28.
- Hägglund, B. 1981. Evaluation of forest site productivity. *Forestry abstract* 42(11): 11-15
- Harper, J.L. 1977. Population biology of plants. Academic Press, London, England. 892 pp.
- Ivancich, H., P. G. Martínez & P. L. Peri. 2011. Modelos forzados y no forzados para el cálculo del índice de sitio en bosques de *Nothofagus antarctica* en Patagonia Sur. *Bosque* 32(2): 135-145.
- Kramer, H. & A. Akca. 1995. *Leiffaden zur Waldme Blehre*. J. D. Sauerlander's Verlag, Frankfurt, Alemania: 278.
- Maldonado, R. F. 1984. Índice de sitio y modelos de crecimiento para *Pinus oocarpa* Mirov. en la región de los "Coatlan", Oaxaca. Tesis (maestría), Colegio de Postgraduados, México: 23.
- Márquez, J., J. Alba., L. Mendizábal., E. O. Ramírez., & H. Cruz. 2009. Fuentes semilleras mejoradas establecidas en el Estado de Veracruz. *Foresta Veracruzana* 11(2):37-42.
- Munier, N. 2004. *Multicriteria environmental assessment*. Kluwer Academic Publishers. Netherlands: 145-155.
- Musálem, L. F. 1977. Tablas de producción preliminares de Atenquique. Memoria del Curso de Silvicultura en Montes de Coníferas. SARH-SFF, México: 409-432.
- Orantes G. F. R. 1980. Determinación de calidad de estación para *Pinus hartwegii* Lindl en Zoquiapan, México. Tesis (maestría) Universidad Autónoma Chapingo, México: 77.
- Pineda, J. N.P., S. J. Bosque., D. M. Gómez., P. R. Franco., N. X. Antonio., & S. L. R. Manzano. 2012. Determination of optimal zones for forest plantations in the State of Mexico using Multi-Criteria Spatial Analysis and GIS. *Journal of Geographic Information System* (4): 204-218.
- Regil, G. H. H. & M. S. Franco. 2009. Nivel de adecuación del territorio para el desarrollo de especies agrícolas y forestales en el Parque Nacional Nevado de Toluca. *Economía, Sociedad y Territorio* 9(31): 803-830.

- Revolorio, Q. A. J. 1996. Evaluación de calidad de sitio para *Pinus oocarpa* Schiede, en la zona de amortiguamiento de la Reserva de la Biosfera Sierra de Las Minas, Guatemala. Tesis (Maestría). CATIE, Turrialba, Costa Rica: 87-103.
- Rodríguez, F. C. 1980. Estudio epidométrico de *Pinus montezumae* Lamb., mediante análisis troncales en el campo experimental San Juan Tetla, Puebla. Tesis (maestría) Universidad Autónoma Chapingo, México: 406.
- Saaty, T. 1980. The analytic hierarchy process planning, priority setting, resource allocation. McGrawHill:287.
- Spurr, S. y B. Burtonv, (1982) Ecología forestal. 1ra. Edición. México. Edit, AGT EDITOR, S.A.
- Steubin, L., R. Godoy., A. Alberdi. 2001. Métodos de ecología vegetal. Universitaria. Santiago de Chile: 160-175
- Stiff, C., T. Dechert., N. Pérez. & M. Valdez. 1991. Manual de implementación para la clasificación de la calidad de sitio y productividad en los bosques de pino de las tierras altas del Centro de Honduras. ESNACIFOR-COHDEFOR/USAID, Tegucigalpa, Honduras: 43.
- Valdez, H. J.I. 2002. Aprovechamiento forestal de manglares en el estado de Nayarit, Costa Pacífica de México. Madera y Bosques, Número especial: 129-145.
- Vicent, L. 1975 Manejo de plantaciones forestales con fines de producción, Tesis (maestría) Mérida. Universidad de los Andes, Venezuela: 152.
- Villers-Ruiz, L.; L. García del Valle., J. López-Blanco. 1998. Evaluación de los bosques templados en México: una aplicación en el parque nacional Nevado de Toluca. Investigaciones Geográficas, 36: 7-21.
- Willan, R. L. 1984. Rodales semilleros de procedencia y rodales de conservación de procedencia. Nota técnica no. 14. Dinamarca.



SUELO



BOSQUE



INCENDIO FORESTAL

7.3 Zona aptas para la recuperación del bosque de alta montaña del Estado de México

Cumpliendo con el objetivo planteado en esta investigación se generó un mapa con el grado de aptitud ambiental y calidad sitio, en el que se identificaron siete sitios que coincidieron en calidad de sitio y ambiental, sin embargo sólo se identificó un sitio con el grado de aptitud alto en ambos casos. Se localizó en la Sierra de las Cruces a 3521 msnm con una orientación 165° SE y una pendiente de 3°, tiene una luminosidad del 61%, una altura de pastizal de 41 cm, sin erosión, y con espesor de la materia orgánica de 6.1 cm (Figura 19).

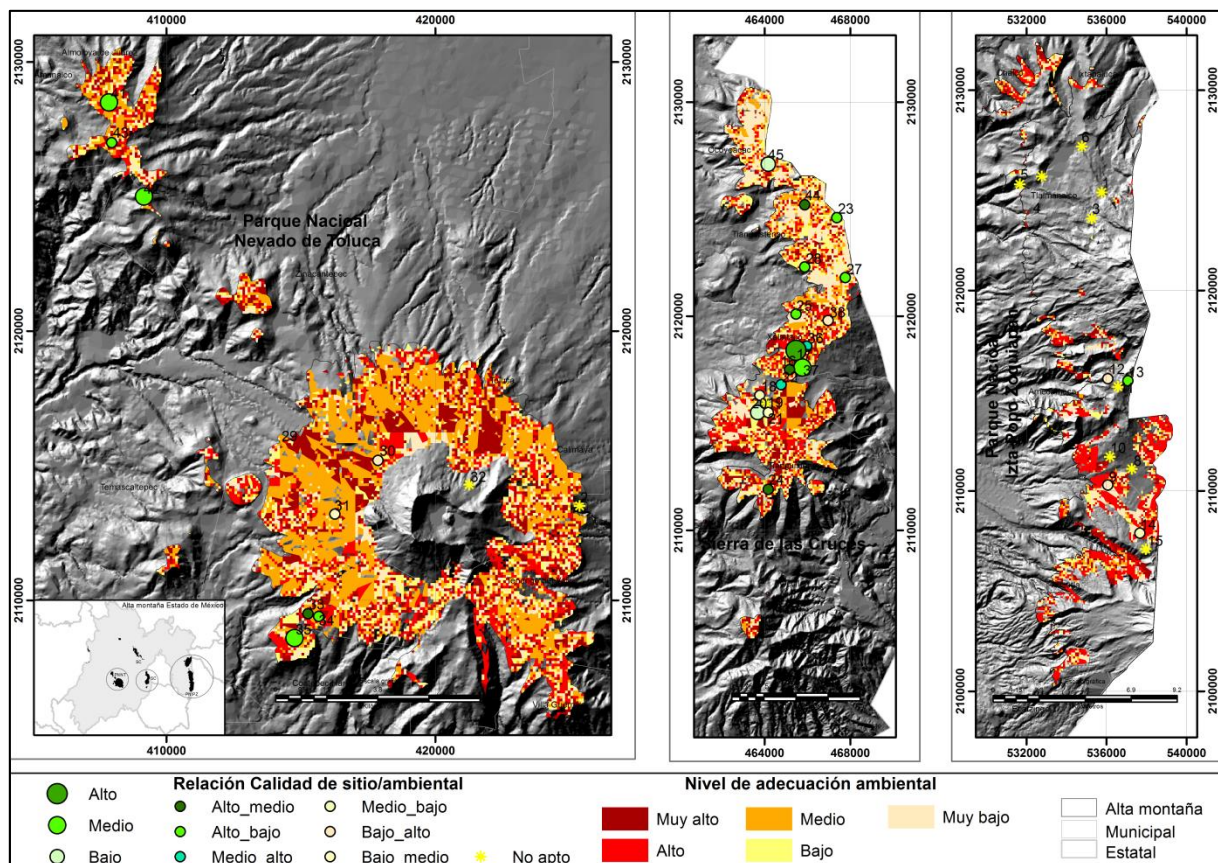


Figura 19. Relación grado de aptitud ambiental/calidad de sitio

En términos de clima, se localiza en una zona donde la temperatura media anual es de 9.5 °C con una precipitación anual de 1250 mm, para el caso de las variables de suelo, se localizó en un tipo de suelo de tipo andosol con una profundidad efectiva del suelo de 83 cm, no presenta plagas ni indicios de incendio forestal.

Para el caso de las variables dasonómicas, cuenta con 12 plantines/400m², los cuales tienen una altura promedio de 22.8 cm con una edad promedio de 7 años, también se identificaron 116 brinzales/400m² con una altura promedio de 1 m y una edad 10 años, se contaron 52 latizales/400m² con una altura promedio de 1.7 m y una edad de 12 años. Finalmente se identificaron 35 árboles con DAP > 2.5 cm con diámetro promedio de 10.4 cm, una altura de 5.5 m con altura comercial de 3.4 y una altura de fuste limpio de 4 m, tienen un diámetro de copa de

1.9 m. Además, el árbol semillero tiene un DAP de 47 cm, una altura total de 18 m con una altura comercial y fuste limpio de 12 cm, con un diámetro de copa de 7 m y una edad de 65 años.

Estructura y regeneración

La estructura vertical del bosque de alta montaña esta representada por cinco estratos ($p < 0.05$). Para el caso del primer estrato tiene alturas promedio de 2.3 m, los árboles con DAP de 10-15 cm muestran alturas promedio de 4.7 m, las clases 20 y 25 tienen alturas 7.3 y 9.7 respectivamente, finalmente, los individuos con DAP > a 30 cm tienen una altura promedio de 13.4m (Figura 20).

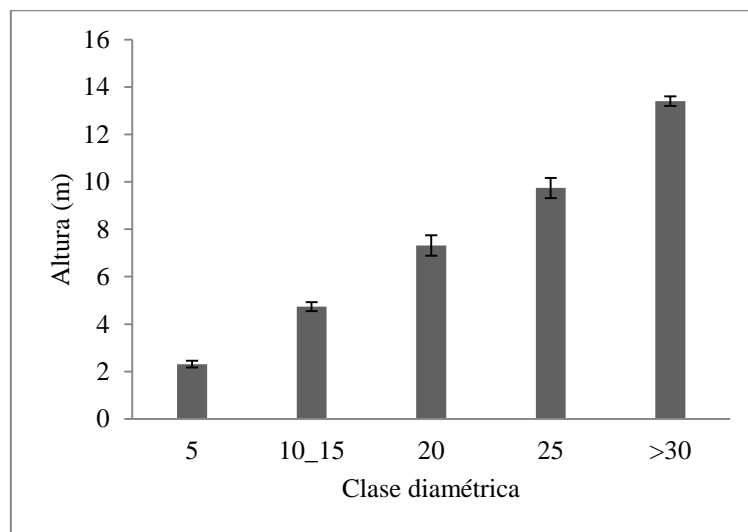


Figura 20. Estructura vertical

Considerando el número de individuos por clase diamétrica, el bosque presenta la forma de J invertida (Figura 21) que es normal para el bosque de alta montaña (Endara et al., 2012) y típico para bosques tropicales (Lamprecht, 1990).

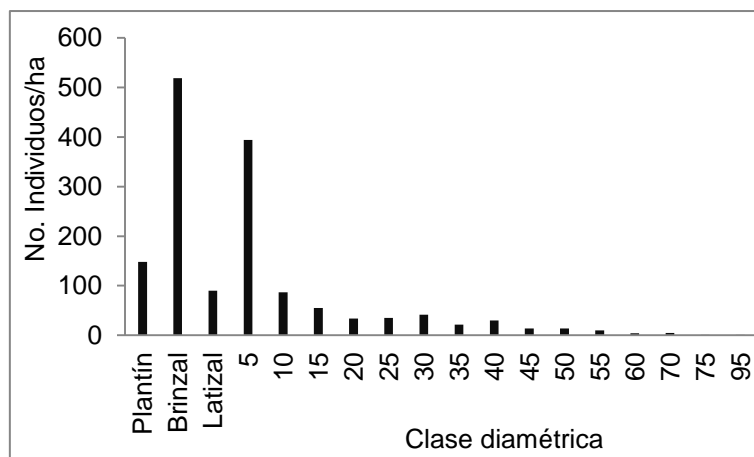


Figura 21. Estructura horizontal

La regeneración (plántulas, brinzales y latizales) en el bosque semidenso es de 203 individuos/ha, mientras que en el bosque fragmentado es de 49 individuos/ha. Para el caso de los individuos con DAP ≥ 2.5 cm del bosque semidenso, se identificaron 31 individuos/ha. Esto difiere con lo reportado por Endara *et al.* (2012) en el bosque de *P. hartwegii* Lindley, estimaron 336/ha (DAP ≥ 2.5 cm), cabe aclarar que sus resultados son producto de un muestreo en bosque denso.

De forma general en el bosque de alta montaña en una superficie de 400 m² se tiene un promedio de 37 árboles, predominando principalmente árboles de regeneración, en contra parte Endara y colaboradores (2012) estima que aproximadamente en una ha se encuentran 780 arboles de regeneración, si consideramos 400 m², el comportamiento es similar a la empleada en este trabajo, ya que se contaron 31 individuos/400 m² en el trabajo de Endara *et al.* (2012).

La regeneración del bosque de alta montaña del Estado de México se caracteriza por tener una altura promedio en plántulas de 22 cm con una edad promedio de 6 años, los brinzales una altura total (AT) de 92 cm y una edad de 10 años, finalmente, los latizales tienen una AT de 1.8 m con una edad de 15 años y DAP de 1.9 cm.

7.4 Características físico-químicas del suelo en el Bosque de Alta montaña del Estado de México

En general, todos los nutrientes del suelo presentan una marcada tendencia a disminuir en relación a la profundidad del suelo. Esto se debe a que en la capa de 0-30 cm es donde se presenta la mayor acumulación y descomposición de la materia orgánica, además de la acumulación de ceniza volcánica; es decir el contenido de nutrientes está directamente relacionado con la disponibilidad de los aportes de la materia orgánica depositada en las capas superficiales.

Los valores de los mínimos, máximos, medias y el coeficiente de variación para cada una de las variables de suelo evaluadas en este estudio se presentan en el cuadro 21.

Cuadro 21. Valores estadísticos de los análisis de físico-químicos de los suelos de la alta montaña del Estado de México

Elemento del suelo	Profundidad del suelo	Media	D.E.	E.E.	CV	Mín	Máx
Calcio (Cmol.Kg ⁻¹)	0-30	2.23	2.14	0.47	96.16	-3.45	5.8
	30-60	1.71	1.66	0.37	96.69	-1.25	5.35
	60-90	1.68	1.38	0.33	82.17	-0.1	4.85
Magnesio (Cmol.Kg ⁻¹)	0-30	2.65	1.24	0.27	46.8	0.9	5.4
	30-60	2.23	1.22	0.27	54.58	1.05	5.6
	60-90	2.32	1.48	0.35	63.75	0.9	6.15
Densidad aparente (g/ml)	0-30	0.77	0.14	0.03	18.86	0.59	1.22
	30-60	0.86	0.17	0.04	19.88	0.63	1.26

	60-90	0.92	0.2	0.05	21.73	0.63	1.38
	0-30	41.38	55.18	12.04	133.35	0.56	181.51
Fósforo (mg Kg ⁻¹ de suelo)	30-60	25.88	24.54	5.49	94.81	0.75	116.23
	60-90	21.77	29.01	6.84	133.27	2.64	126.83
	0-30	10.84	4.24	0.92	39.06	3.1	20.74
Humedad (%)	30-60	7.87	3.41	0.76	43.29	1.74	15.41
	60-90	7.38	3.43	0.81	46.41	1.24	14.46
	0-30	3.02	1.77	0.39	58.65	-0.25	7.34
Materia orgánica (%)	30-60	2.4	1.74	0.39	72.53	-1.99	4.7
	60-90	1.98	1.38	0.33	69.78	0.09	4.06
	0-30	2.08	1.17	0.26	56.27	0.28	4.32
Nitrógeno (%)	30-60	2.01	1.47	0.33	73.27	0.14	5.45
	60-90	1.35	0.39	0.09	28.6	0.83	2.09
	0-30	5.01	0.57	0.12	11.42	4.06	5.97
pH	30-60	5.11	0.56	0.12	10.87	4.02	6.03
	60-90	5.28	0.55	0.13	10.45	4.52	6.83

Un factor que puede estar incidiendo en la fertilidad de los suelos del bosque de alta montaña, son los incendios forestales. Esta puede ser una de las causas de las diferencias encontradas en la concentración de nutrientes a diferentes profundidades.

Los suelos de alta montaña del Estado de México se caracterizan por ser de tipo andosoles, regosoles y leptosoles (GEM, 2000). Los suelos se caracterizaron por altos contenidos de P, el cual actúa como limitante para el crecimiento vegetal ya que el ión fosfato es la fuente más utilizada por la planta, pero altas concentraciones altera su desarrollo (Borie y Rubio, 2003; McDowell y Stewart, 2006).

Cuadro 22. Relación de la densidad del bosque, incendios y análisis de suelos (0-30cm) de la alta montaña

Densidad del bosque	No. Incendios 2006-2012	Variable	Media	D.E.	E.E.	CV	Mín	Máx
Denso	110	Ca (Cmol.Kg ⁻¹)	2.7	2.18	0.82	80.7 1	0.05	5.8
		Mg (Cmol.Kg ⁻¹)	2.63	0.97	0.37	37.0 3	1.15	3.5
		Dap(g/ml)	0.76	0.09	0.03	11.9 9	0.65	0.88
		P(mg Kg ⁻¹ de suelo)	17.26	10.35	3.91	59.9 6	5.29	37.6
		Humedad (%)	10.25	3.44	1.3	33.5 3	7.44	16.84
		M.O (%)	3.11	1	0.38	32.0 3	1.8	4.3
		N (%)	2.41	1.32	0.5	54.9 7	0.83	4.32
		pH	5.13	0.62	0.23	12.0 5	4.06	5.86
Semidenso	51	Ca (Cmol.Kg ⁻¹)	2.54	1.52	0.58	59.9 2	0.8	4.95
		Mg (Cmol.Kg ⁻¹)	2.55	1.22	0.46	48.0 9	1.25	4.05
		Dap(g/ml)	0.69	0.12	0.04	17.1	0.59	0.93

					7		
		P(mg Kg ⁻¹ de suelo)	27.38	15.44	5.84	56.3 8	4.29 49.93
		Humedad (%)	12.32	5.84	2.21	47.4	3.1 20.74
		M.O (%)	3.03	2.71	1.02	89.4 2	- 0.25 7.34
		N (%)	1.93	1.02	0.38	52.7 6	0.97 3.49
		pH	4.98	0.54	0.2	10.8 4	4.34 5.97
		Ca (Cmol.Kg ⁻¹)	1.44	2.67	1.01	185. 4	- 3.45 5.2
		Mg (Cmol.Kg ⁻¹)	2.76	1.62	0.61	58.7 5	0.9 5.4
		Dap(g/ml)	0.85	0.18	0.07	21.0 3	0.71 1.22
		P(mg Kg ⁻¹ de suelo)	79.5	84.86	32.0	106. 7	0.56 181.5 1
Fragmentado	28	Humedad (%)	9.96	3.16	1.2	31.7 7	6.1 14.15
		M.O (%)	2.93	1.46	0.55	49.8 4	1.66 5.55
		N (%)	1.91	1.27	0.48	66.3 1	0.28 3.63
		pH	4.91	0.62	0.24	12.6 8	4.42 5.86

Contenido de Ca²⁺

El contenido de Calcio (Ca²⁺) mostró el mismo comportamiento que el reportado por Revolorio (1996) para *Pinus oocarpa*, pues a medida que aumenta la profundidad del suelo, la disponibilidad de este disminuye, pero analizando la primer capa (0-30 cm) con la densidad del bosque, se identificó que los bosques densos tienen mayor disponibilidad de Ca²⁺, sin embargo no tiene diferencias significativas ($p > 0.05$) en la disponibilidad con el resto de las clases de densidad, por lo que se concluye que, la disponibilidad del Ca²⁺ no está influenciado por la densidad del bosque (Figura 22), ni con el número de incendios, sino con la profundidad del suelo.

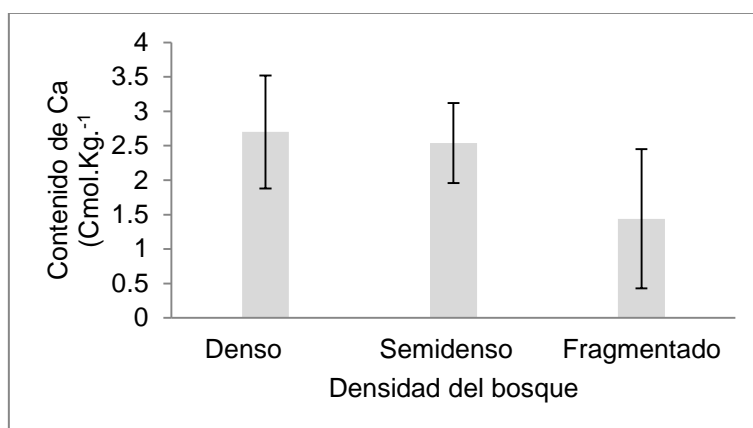


Figura 22. Relación densidad del bosque/Ca²⁺

Contenido de Mg^{2+}

El contenido de Mg^{2+} en los suelos de la alta montaña, no mostró diferencias significativas ($p > 0.05$) con respecto a la profundidad (Cuadro 22), mismo comportamiento con la densidad del bosque, no se identificaron diferencias significativas ($p > 0.05$), por lo que sugiere que la disponibilidad de este nutriente no tiene relación con la densidad del bosque (Figura 23), sino básicamente, las variaciones en caso de que se puedan presentar se deban a los aportes del material parental (Davey, 1983) citado por Revolorio (1996).

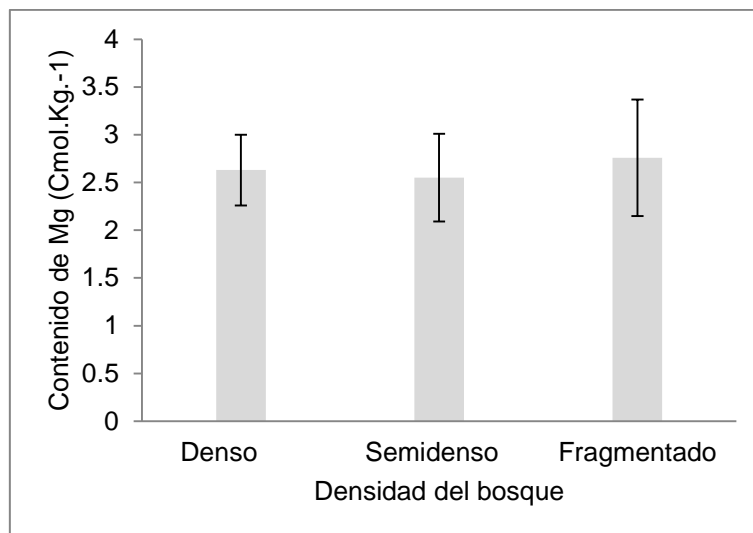


Figura 23. Relación densidad del bosque/Mg

Densidad aparente

La densidad aparente está relacionada directamente con la disponibilidad del material parental y materia orgánica; es decir, entre más materia orgánica, la densidad del suelo disminuye. Generalmente, los suelos superficiales poseen una densidad de partículas más bajas que en las del subsuelo (Buckman y Brady, 1977), y entre más mineralización mayor es la densidad del suelo y un bajo contenido de materia orgánica (Plaster, 2004). Este comportamiento se presenta en los bosques de la alta montaña (Cuadro 22), pues a medida que aumenta la profundidad del suelo, la densidad se incrementa, esto es característico de suelos volcánicos (Porta y Cols, 1999). Por otra parte, la pérdida de bosque también ha ocasionado la compactación de los suelos de la alta montaña, principalmente se ve reflejado en bosques fragmentados, mientras que en bosques densos y semidensos no presentan diferencias significativas ($p > 0.05$) en la densidad aparente (Figura 24).

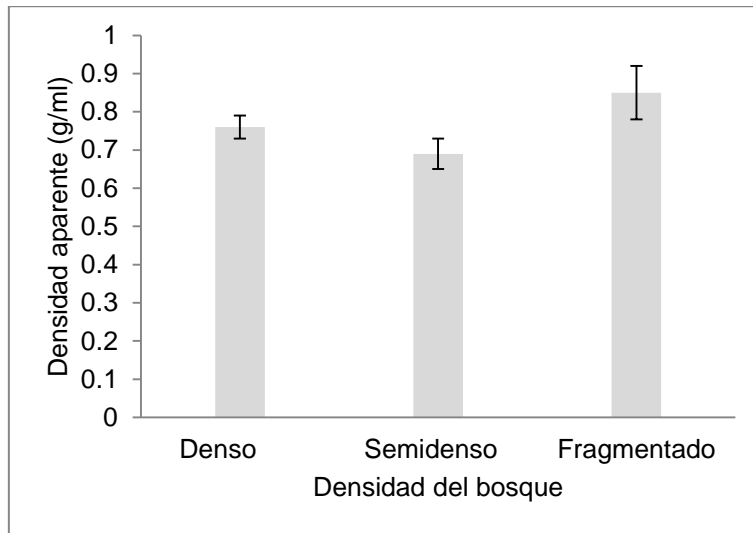


Figura 24. Relación densidad del bosque/densidad aparente

Contenido de Fósforo

El contenido de P en el bosque de alta montaña tiene una relación negativa con el número de incendios y densidad del bosque, ya que a medida que se presentan más incendios en zonas de bosque denso, la disponibilidad de este disminuye (Chacón y Dezzeo, 2004) (Figura 25), mientras que el alto contenido de P en zonas de bosque fragmentado se debe principalmente a la abundancia de pastizales. Otro dato a considerar es que la disponibilidad de este va disminuyendo a medida que aumenta la profundidad del suelo (Cuadro 22), esto indica que la actividad microbiana se presenta con mayor intensidad en la capa de 0-30 cm.

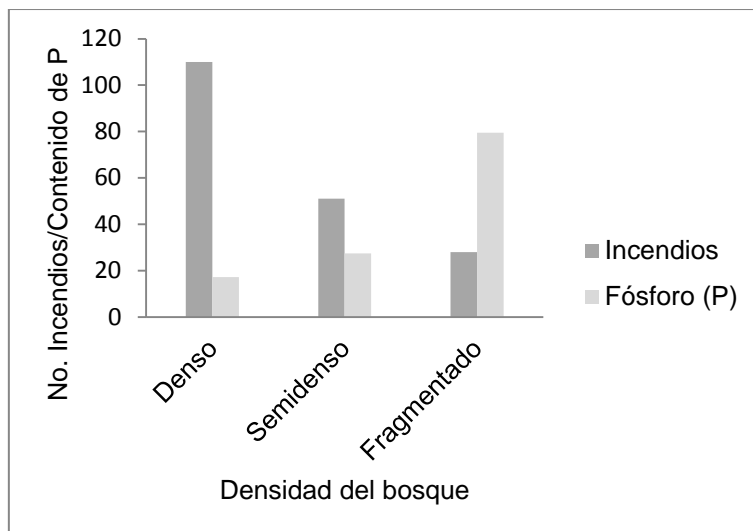


Figura 25. Relación No. Incendios-Contenido de fósforo (p) con la densidad del bosque

Fuente. Elaboración propia con base de datos sobre incendios (PROBOSQUE, 2012)

Contenido de Nitrógeno (%)

Los resultados sobre la distribución del N en los suelos de la alta montaña, mostraron que esta va disminuyendo a medida que la profundidad aumenta, sin embargo en las dos primeras capas no

muestran diferencias significativas ($p > 0.05$), las diferencias se presentan con la última capa. (Figura 26).

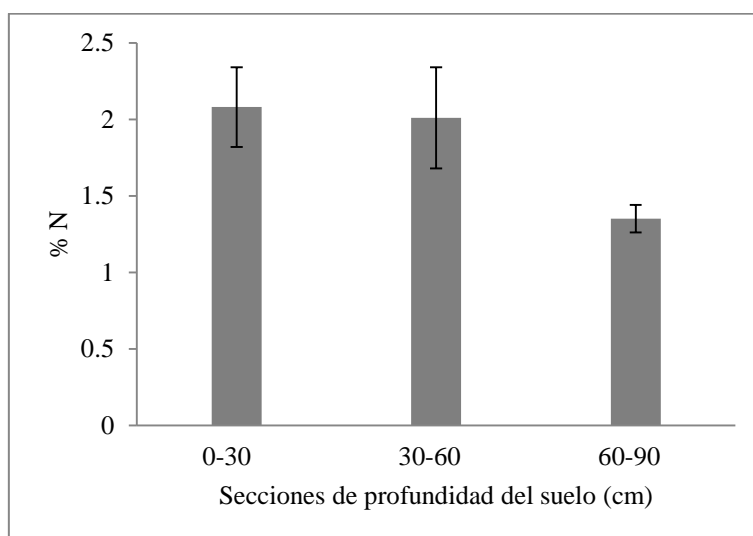


Figura 26. % de N a diferente profundidad

Contenido de humedad

Esta puede estar determinado por la densidad del bosque, que es uno de los problemas del PNNT (Endara *et al.*, 2013). En este caso, el contenido de humedad puede alterarse y modificar los procesos de otros elementos en el suelo. Otro de los elementos que influye en el contenido de humedad es la exposición a la radiación solar, (Chacón *et al.*, 1998), encontraron que la sobrevivencia de plántulas disminuye si incrementa la radiación y por tanto la humedad disminuye. Por su parte Pérez y Ramos (2007) mencionan que elementos que influyen en la regeneración, es la disponibilidad hídrica, intensidad lumínica, acidez y espesor de la capa de hojarasca.

El contenido de la humedad en el bosque de alta montaña va disminuyendo a medida que aumenta la profundidad del suelo, esto se debe principalmente al espesor de la materia orgánica (4.5 cm). Lo cual permite una mayor retención de humedad, y por lo tanto, es un buen indicador para la regeneración (Estrada, 1997).

pH

Es la variable que menor variación muestra, ya que a medida que aumenta la profundidad del suelo, también disminuyen los niveles de pH, esto puede ser atribuido al bajo contenido de bases a esa profundidad.

Los suelos del bosque de alta montaña se caracterizan por ser moderadamente ácidos y cumplen con los rangos óptimos para especies de pino, que es de 4.5 a 6.5 (Davey, 1983), mientras que la CONAFOR (2007) menciona que se distribuye en suelos con pH de 6.1 a 6.9, por su parte,

Villers *et al.* (1998) reportan que en esta zona los valores de pH son de 5. Por otra parte, los niveles de pH muestran diferencias significativas a partir de los 60 cm de profundidad ($p < 0.05$). De acuerdo a los análisis de suelos realizados, en 21 sitios del bosque de alta montaña, el pH vario de 4.02 a 6.83, de fuertemente ácidos a moderadamente ácidos, este comportamiento es similar en los tres estratos (submuestras) (Figura 27).

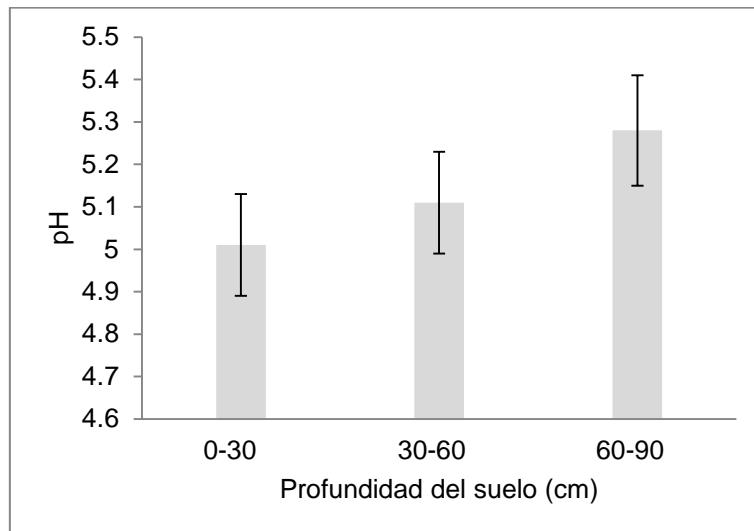


Figura 27. Relación profundidad del suelo/pH

8. CONCLUSIONES GENERALES

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo principal identificar zonas aptas para la recuperación del bosque de alta montaña del Estado de México. Esto implicó definir criterios ambientales y de calidad de sitio. Para el primer caso se emplearon variables topográficas, climáticas y de suelo; mientras que para el segundo, se utilizaron variables ambientales y de calidad de sitio. Los análisis fueron realizados mediante la Evaluación Multicriterio y Sistemas de Información Geográfica, esto permitió obtener dichas zonas, así como formular las siguientes conclusiones.

El estudio muestra que la especie de *P. hartwegii* es la especie forestal que mejor se ha adaptado a las condiciones ambientales extremas, ya que de acuerdo al mapa de ocupación del suelo 2012 cuenta con 22 648 ha de bosque denso, aunado a eso, las mejores condiciones ambientales para establecer zonas de recuperación del bosque de alta montaña, se localizaron en Parque Nacional Nevado de Toluca y Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan, las cuales tienen una mayor nivel altitudinal en relación a la Sierra de las Cruces.

Considerando el grado de aptitud ambiental, las tres zonas más representativas de la alta montaña (PNNT, PNIPZ y SC) presentan condiciones similares en topografía y clima, sin embargo, en términos de la densidad del bosque, las mejores condiciones se localizaron en el PNIPZ.

Aplicando la EMC, los resultados mostraron que las mejores condiciones ambientales para establecer zonas de recuperación del bosque de alta montaña del Estado de México, se localizaran en la Áreas Naturales Protegidas como el PNNT y PNIPZ, esto demuestra que las especies de alta montaña se pueden seguir adaptando a estas condiciones extremas, sin embargo también es notorio que las actividades como la agricultura y pastoreo están presentando este mismo comportamiento, ya que se pueden observar pequeñas manchas con presencia agrícola o expansión de pastizales, es decir no sólo las especies forestales se están adaptando, sino también la expansión de cultivos se desplazan hacia un mayor limite altitudinal.

Aunque los resultados mostraron diferencias en la distribución espacial de los diferentes grados de aptitud con los reportados por Regil *et al*, (2009) y Pineda *et al*, (2012), se justifica, debido a que los rangos de aptitud para cada factor fueron establecidos de acuerdo a información de campo y soportada con fuentes de información existente, además de ello, la ponderación de factores fue diferente a la empleada por los autores antes mencionados.

El análisis de la Chi cuadrada (X^2) de cada uno de los factores de calidad de sitio mostró que, los puntos de muestreo se caracterizan por contar con nivel de aptitud de media a alto, y a nivel de zonas (PNNT, PNIPZ y SC), se caracterizan por un nivel de aptitud de medio a alto en calidad de sitio.

En términos de regeneración, el comportamiento en densidad entre la regeneración y los individuos con DAP > 2.5 cm, es similar. Estas condiciones se deben principalmente a: la presencia de rodales semilleros, a una profundidad del suelo mayor a los 30 cm, espesor de la materia orgánica mayor a 1 cm; además, el alto porcentaje de luminosidad y la evidencia de incendios forestales, los cuales inducen a una mayor germinación de semillas. Esto permite concluir que el bosque de alta montaña se encuentra en un estado de equilibrio debido a la presencia de rodales semilleros, los cuales han permitido el establecimiento de la regeneración y consigo una regeneración avanzada, así mismo un mayor número de estratos identificados con respecto a los reportados por Endara *et al*, (2012), sin embargo el número de individuos y alturas por estrato se ve disminuido.

El índice de sitio (IS), permitió evidenciar que el bosque de alta montaña a pesar de contar con un equilibrio en la densidad entre las categorías de estructura y regeneración, en términos de alturas, las especies van cesando su crecimiento a medida que se incrementa el gradiente altitudinal. Tomando como base este comportamiento, las mejores zonas con aptitud óptima en calidad de sitio, se localizaron en sitios con menor altitud, como es el caso de la Sierra de las Cruces.

La relación del grado de aptitud ambiental y calidad de sitio no fue representativa, debido a que sólo se identificó un sitio que cumple con el grado de aptitud alto en las dos condiciones, por lo tanto, el presente estudio permite evidenciar que se debe prestar mayor atención al manejo de los bosques desde el punto de vista dasonómico. Este comportamiento nos inclina a pensar que además de considerar variables de calidad de sitio, es necesario analizar el tipo de manejo forestal que sufre un Área Natural Protegida y una manejada sin este tipo de categoría.

Con respecto a las condiciones físico-químicas del suelo de los bosques de la alta montaña, los resultados mostraron que a medida que incrementa la profundidad del suelo, la disponibilidad de los diferentes nutrientes disminuye. Por otra parte, se encontró una relación positiva entre la densidad del bosque y número de incendios con la disponibilidad de nutrientes del suelo, es decir, que entre más denso se encuentre el bosque y con mayor número de incendios, mayor es el contenido de nutrientes en el suelo. De forma general se

puede decir que los incendios forestales en la alta montaña han favorecido la disponibilidad de nutrientes, y por tanto puede estar influyendo en la regeneración del bosque.

Finalmente, la presente investigación tiene una relevancia importante, debido a que considero una serie de variables, tanto ambientales como dasonómicas, lo que hizo posible identificar a nivel puntual el grado de aptitud para recuperación del bosque de alta montaña del Estado de México, sin embargo para poder caracterizar a nivel de áreas, es necesario un trabajo de campo con la suficiente cantidad de sitios de muestreo; así como una distribución heterogénea de los mismos.

9. RECOMENDACIONES

El trabajo de investigación demostró que desde el punto de vista ambiental, las mejores zonas se localizan en el Parque Nacional Nevado de Toluca y Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan, sin embargo desde el punto de vista de la calidad de sitio, las mejores zonas se localizaron en la Sierra de las Cruces. Por lo que es recomendable aplicar un plan de manejo en esta zona, ya que ofrece innumerables ventajas, desde las ambientales hasta las propiamente referidas a las condiciones del arbolado.

Como se observó en el estudio, la variable altitud resultó determinante para la ubicación de estas zonas, por lo que sugiere tomar un mayor número de unidades de muestreo a diferentes rangos altitudinales y por estratos de densidad del bosque, esto con el objetivo de identificar zonas semilleras aptas para la repoblación del bosque de alta montaña.

Además de las restricciones empleadas en el análisis de este trabajo, es preciso considerar aquellas zonas plagadas por *Arceuthobium globosum*, *A. vaginatum* y *Dendroctonus adjunctus*, esto implica un trabajo arduo de localización; también es necesario considerar aquellas que han sido incendiadas con frecuencia, así como la localización de pastizales naturales.

Finalmente se recomienda que en posteriores trabajos referidos a la recuperación de los bosques de alta montaña, se incluyan variables del sector social, ya que es la población local la que ha originado alteraciones del medio natural, aunque también son los interesados en la conservación de sus recursos naturales.

Finalmente se recomienda que las zonas óptimas identificadas sean destinadas a la producción de semilla, pero que esta sea en el mismo sitio, y así evitar gastos considerables en el mantenimiento del mismo y la alta mortalidad de individuos que no se adaptan a las condiciones ambientales extremas.

10. LITERATURA CITADA

- Alcalá, J., J. Rodríguez., C. Villar., M. Sosa., G. Heredia y H. Bolaños., (2009) “Criterios e indicadores ambientales como estrategia de gestión ambiental en el ordenamiento territorial: Bosque Modelo Chihuahua”. *Quebracho. Revista de Ciencias Forestales* 1(17): 77-87.
- Alder, D. (1980) “Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento; con referencia espacial a los trópicos”. *Roma FAO* 2(22): 198.
- Alejano, R., (2003) “La regeneración de pinares mediterráneos naturales con especial referencia a *Pinus nigra* ssp. *Salzamannii*”. *Actas de la III Reunión sobre Regeneración Natural-IV Reunión sobre Ordenación de Montes*. Universidad de Huelva, España 15:77-87.
- Arriaga, V.; Cervantes, V.; y A. Vargas. (1994) *Manual de reforestación con especies nativas: colecta y preservación de semillas, propagación y manejo de plantas*. Instituto Nacional de Ecología. México. D.F. 8p.
- Atárola, E.; Freitas, L.; Linares, C.; Baluarte, J., (2001) “Estimación de la calidad de sitio mediante índices de sitio para *Cedreligna catenaeformis* Duke (Tornillo) en plantaciones de Jenaro Herrera, Loreto (Perú)”. *Folia amazónica* 1(12): 39-51.
- Barba, R. S y S. Pomerol, (1997) *Decisiones multicriterio. Fundamentos teóricos y utilización práctica*. Colección de Economía. Universidad de Alcalá. 420 p.
- Bobbink, R.; Hill, G. W.; Verduyn, B., (2003) ”Main-induced changes cover in the Iztaccihuatl-Popocatepetl Region Ecology and Man in Mexico Central Volcanoes Area”. *Netherlands*: 49-103.
- Bockheim, J. (1991) Young, R. *Introducción a las ciencias forestales: Suelos forestales*. México, Limusa.
- Bosque, J (2000) *Sistemas de Información Geográfica*. 2da. Ed. Madrid, España: RIALP.
- Borie, F.; Rubio, R.; E. Moraga., (1989) “Macromolecule- P associations and inositol phosphates in some chilean volcanic soils of temperate regions”. *Commun. Soil Sci. Plant Anal* 20:1881-1884.
- Brosovich, M. M. (1998) *Determinación de la densidad de Pinus patula Schl. et Cham., en la región de Zacualtipan, Hidalgo, México*. Tesis de maestría. México, Colegio de Posgraduados. Texcoco.
- Buckman, H. O.; Brady N.C., (1977) *Naturaleza y propiedades de los suelos*. Ed. Montaner y Simón, S.A. Barcelona.
- Carmean, W. (1975) “Forest site quality evaluation in the United States” in *Agronomy*. 27:209-269.
- Chacón, J. M.; Sótelo, A.; M. A. Musálem., (1998) “Comportamiento de la repoblación natural de *Pinus arizonica* Engelm bajo diferentes coberturas”. *Madera y Bosques*. 4(2): 39-44.

- Castaño, M. (1962) Evaluación de la calidad de estación de *Pinus patula*, en el norte Oaxaca, Secretaria de Agricultura y Ganadería, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, México, *Boletín técnico* 2:32.
- Cedillo, M. (2012) Distribución espacial y análisis de la presencia de plagas forestales en el Parque Nacional Nevado de Toluca. Tesis de licenciatura. México, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca.
- CEOTMA. (1991) Guía para la elaboración de estudios del medio físico. Contenido y Metodología. Centro de Estudios de Ordenación del Territorio y Medio Ambiente. 3ª Ed. Madrid, España.
- Chacón, N., Dezzeo, N., (2004) “Phosphorus fractions and sorption processes in soil samples taken in a forest-savanna sequence of the Gran Sabana in southern Venezuela”. *Biol. Fertil. Soils* 40: 14-19.
- Chuvieco, E., (1996) *Fundamentos de Teledetección Espacial*. 3ra. Edición. Madrid. RIALP, S. A.
- Clutter, J.; Fortson, J.; L. Pienaar; H. Brister; R. Bayley., (1983) *Timber management: a quantitative approach*. New York. John Willey and Sons. 333p.
- CONAFOR-CONABIO. (2007). “Fichas Técnicas”. [conafor.gob.mx](http://www.conafor.gob.mx) (En línea). México, disponible en: <http://www.conafor.gob.mx/portal/index.php/temas-forestales/reforestacion/fichas-tecnicas>.
- Curtis, R. (1964) “A stem-analysis approach to site-index curves”. *Forest science*. (10)2:241-256.
- Dones, J.; Ruiz, S.; M. Cabrera; M. González., (1997) Densidad y área basimétrica óptima para el inicio de la regeneración en el monte Pinar de Valsaín. En . F. Puertas Tricas y M. Rivas (eds), *Actas del I Congreso Forestal Hispano-Luso y II Congreso Forestal Español IRATI-97, IV*: 225-230. Gráficas Pamplona. Pamplona.
- Davey, C., (1983) Crecimiento de los árboles y los elementos nutrientes esenciales, Octavo informe anual. Fertilización Forestal en el Valle y el Cauca Cartón de Colombia, pp.13-26.
- Eguiluz, T., (1978) *Ensayo de integración de los conocimientos sobre el género Pinus en México*. Tesis profesional. México, Departamento de Enseñanza, Investigación y Servicios en Bosque, Universidad Autónoma de Chapingo.
- Endara, A. R.; Calderón, R.; G. Nava; S. Franco., (2013) “Analysis of fragmentation processes in high-mountain forests of the center of Mexico” *American Journal of Plant Sciences*, (4):697-704. [doi:10.4236/ajps.2013.43A088](https://doi.org/10.4236/ajps.2013.43A088).
- Endara, A. R.; Franco, M. S.; Nava, B. G.; Valdez, H. J. I.; Fredericksen, T. 2012. “Effect of human disturbance on the structure and regeneration in the Nevado de Toluca National Park, México” *Journal of Forestry Research* 23(1):39-44. Doi: 10.1007/s11676-012-0226-8.

- Endara A. R. (2010) *Análisis de los procesos de recuperación en el bosque templado del Parque Nacional Nevado de Toluca*. Tesis de Doctorado. México, Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca.
- Estrada, C., (1997) *Evaluación de la regeneración natural en bosques de pino de la ECODEFO No. 4 de Durango, México*. Tesis de maestría. México, Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Forestales, Linares.
- FAO, (1959) “Elección de especies arbóreas para plantación” *Forestry Development Paper* (13): 375.
- Franco, S.; Regil, H. H.; C. González; G. Nava, (2006) “Cambio de suelo y vegetación en el Parque Nacional Nevado de Toluca, México, en el Período 1972-2000 (parte B)”. *Revista Investigaciones Geográficas* 061 (1): 51–53.
- Franco, S., Valdez, M. E. (2003) *Principios básicos de cartografía y cartografía automatizada*. México, Ciencias naturales y exactas.
- Mostacedo, B. y Fredericksen, T. S (Eds), (2001) *Regeneración y Silvicultura de Bosques Tropicales de Bolivia*. Edit. BOLFOR, Santa Cruz, Bolivia.
- García, A., (1998) “Geoecología del paisaje vegetal en el occidente de la Ciudad de México”. en *Anales de Geografía de la Universidad Complutensse* 18:115-137.
- Guerra, V. y Buendía, E., (2010) “Identificación de suelos erosionados en Tlaxco y Terrenate, Tlaxcala: Magnitud y distribución” *Centro de Investigación Regional Centro INIFAP – Tlaxcala. Folleto técnico*. Diciembre 2010, pp 1-13. Disponible en: <http://www.inifap.gob.mx/circe/publitlax/FOLLETO%20No%2045%20forestal.pdf>
- Gómez Delgado, M. y Barredo, J., (2005) *Sistemas de Información Geografía y Evaluación Multicriterio aplicados al Ordenamiento del Territorio*. Edit. Ra-Ma. Madrid, 276 p.
- Hägglund, B., (1981) “Evaluation of forest site productivity Forestry “ Abstract. 42(11):515-527.
- Harper, J.L., (1977) *Population biology of plants*. Academic Press, London, England, pp 892.
- INEGI, 2000. Geoformas, escala 1:250,000. México.
- INEGI, 2005. Conjunto Nacional de Uso del Suelo y Vegetación, escala 1:250,000. Serie III. México
- IGCEM, 2010. Espacio mapas del Estado de México, escala 1:50, 000. Toluca, México.
- Ivancich, H.; Martínez, G.; P.L. Peri, (2011) “Modelos forzados y no forzados para el cálculo del índice de sitio en bosques de *Nothofagus antarctica* en Patagonia Sur”. *Bosque* 32(2): 135-145.

- Jerez, M.; Moret, A.; O.E. Carrero; R. E. Macchiavelli; A. M. Quevedo, (2009) “Curvas de índice de sitio basadas en modelos mixtos para plantaciones de teca (*Tectona grandis* L. F.) en los llanos de Venezuela”. *Agrociencia* 45(1):135-145.
- Lamprecht, J. (1990) *Silvicultura en los trópicos*. Instituto de silvicultura de la Universidad de Gottingen, Alemania, p335
- López, J. L. (2011) *Localización de áreas óptimas para la recuperación del bosque de pino en el Estado de México mediante técnicas de Evaluación Multicriterio y Sistemas de Información Geográfica*. Reporte técnico de especialidad. México, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca.
- Louman, B., D. Quiros., M. Nilsson, (2001) *Silvicultura de Bosques Latifoliados Húmedos con énfasis en América Central*. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 265p.
- Márquez, J.; Alba, J.; L. C. Mendizábal; Ramírez, E. O.; Cruz, H. (2009) “Fuentes semilleras mejoradas establecidas en el Estado de Veracruz”. *Foresta Veracruzana* 11(2):37-42.
- McDowell, R.W.; Stewart, I., (2006) “The phosphorus composition of contrasting soils in pastoral, native and forest management in Otago, New Zealand: sequential extraction and 31 P NMR”. *Geoderma* 130: 176-189.
- Mena, C., Montecinos, R., (1996) “Comparación de redes neuronales y regresión lineal para estimar productividad de sitio en plantaciones forestales, utilizando geomática” *Bosque* 1 (27): 35-43.
- Monserud, R., (1984) “Height growth and site index curves for Inland Douglas-fir based on stem analysis data and forest habitat type”. *Forest Science*. 30(4):943-965.
- Munier, N., (2004) *Mulcriteria Environmental Assessment*. Ontario, Canada, pp. 132-155
- Murillo, O. (2000) “Índices de calidad para la reforestación en Costa Rica” en *Agronomía Costarricense*. 2(24): 41-47.
- Nava, G.; Endara, A., H. H.Regil; C. Estrada; C. M. Arriaga; S. Franco, (2009) *Los bosques y selvas del Estado de México*. México. Instituto de Ciencias Agropecuarias y Rurales (ICAR-AUEM), Toluca.
- Ortega, A.; Montero, G., (1988) “Evaluación de la calidad de las estaciones forestales. Revisión bibliográfica”. *Ecología* (Esp) 2:155-184
- Palomino, J.; Barra, M., (2003) “Especies forestales nativas con potencial para reforestación en la provincia de Oxapampa y fichas técnicas de las especies de mayor prioridad”. *PRO NATURALEZA*. 10–30p.
- Pérez-Ramos, I. M., (2007) *Factores que condicionan la regeneración natural de especies leñosas en un bosque mediterráneo del sur de la Península Ibérica*. Tesis de Ph. D. dissertation, España, University of Sevilla, Sevilla.

- Pineda, N. B.; Bosque, J.; M. Gómez; R. Franco; X. Antonio, (2012) "Determination of optimal zones for forest plantations in the State of México using Multi-Criteria Spatial Analysis and GIS" in *Journal of Geographic Information System*. 4(3): 204–218. doi:10.4236/jgis.2012.43025.
- Plaster, E. J., (2004) *La ciencia del suelo y su manejo*. Ed. Paraninfo. México.
- Porta, J.; López-Acevedo, M.; C. Roquero., (1999) *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Ed. Mundi-Prensa. Madrid.
- PROBOSQUE, (2010) Inventario Forestal 2010. Protectora de Bosques del Estado de México. Metepec, México.
- Ravelo, C.A. y Abril, G.E., (2007) "Identificación de zonas forestales para pinos en Calamuchita, Córdoba, Argentina". *Memorias de la XI Conferencia Iberoamericana de Sistemas de Información Geográfica*. Buenos Aires, Argentina, pp. 1-5.
- Regil, H. H., (2008) *Nivel de adecuación del territorio para el desarrollo de especies forestales y agrícolas en el Parque Nacional Nevado de Toluca (PNNT)*. Tesis de maestría. México, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca.
- Revolorio, A., (1996) *Evaluación de la calidad de sitio para Pinus oocarpa Shiede, en la zona de amortiguamiento de la Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas, Guatemala*. Tesis de maestría. Guatemala, Centro Agronómico Tropical y Enseñanza.
- Ruiz, B. I., (2002) *Manual de reforestación para América Latina Tropical*. Edición ISDA. Servicio Forestal del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, Instituto Internacional de Dasonomía Tropical, Estación Experimental Sureña, San Juan, Puerto Rico.
- Saaty, T., (1980). *The analytic hierarchy process planning, priority setting, resource allocation*. Ed. McGrawHill. 287, p.
- Salas, G., (1974) "Factores edáficos y climáticos en la clasificación de sitios forestales". *Bosques de Colombia* 1:15-30.
- Santos, P.J.M. y Borderías, U.P., (2002) *Introducción al análisis medioambiental de un territorio*. Vol. 84363 de Educación permanente. UNED. 357 p.
- SEMARNAT., (2002) Norma oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelo, estudio, muestreo y análisis.
- Sitoe, A. A. y Riveiro, N., (1995) *Miombo book Project (Case Study of Mozambique)*. DEF, UEM, Maputo.
- Spurr, S. y B. Burtonv, (1982) *Ecología forestal*. 1ra. Edición. México. Edit, AGT EDITOR, S.A.

Stiff, C.; Dechert, T.; N. Pérez; M. Valdez, (1991) *Manual de implementación para la clasificación de calidad de sitio y productividad en los bosques de pino de las tierras altas del centro de Honduras*. ESNACIFOR-COHDEFOR/USAID, Tegucigalpa, Honduras, 43p.

Strahler, A. N. (1982). Geografía física. Omega. Barcelona.

Vela, G.; Flores, D.; M. Rodríguez; M. Palma; A. García., (2004) *Propiedades edáficas y calidad de sitio de áreas de reforestadas en la Sierra de Guadalupe, Distrito Federal*. Edición a cargo del Consejo de Estudios para la Restauración y Valoración Ambiental (CONSERVA). México. Universidad Autónoma Metropolitana (UAM-XOCHIMILCO).

Velázquez, A.; Mas, J. F.; Díaz, J. R.; Mayorga, R.; Alcántara, P. C.; Fernández, T.; Bocco, G.; Palacio, J. L. (2002) “Patrones y tasas de cambio de uso de suelo en México”. *Gaceta Ecológica* 062: 21-37.

Veblen, T.T., (1992) “Regeneration dynamics” en *Plant Succession: Theory and Prediction*. Glenn-Lewin, D.C., Peet, R.K., Veblen, T.T., eds. Chapman & Hall, London. pp. 152-187.

Valdez-Hernández, J.I., (2002) “Aprovechamiento forestal de manglares en el estado de Nayarit, Costa Pacífica de México”. *Madera y bosques*, Número especial: 129-145.

Villers-Ruiz, L.; L. García del Valle., J. López-Blanco, (1998) “Evaluación de los bosques templados en México: una aplicación en el parque nacional Nevado de Toluca”. *Investigaciones Geográficas*, 36: 7-21.

Vincent, L., (1975) *Manejo de plantaciones forestales con fines de producción*. Merida, Venezuela, Universidad de los Andes. 57p.

Willan, R. L., (1984) Rodales semilleros de procedencia y rodales de conservación de procedencia. *Nota técnica no. 14*. Dinamarca.

Zepeda B., Montero, E., (1984) Ejemplificación de tres procedimientos para caracterizar rodales por su densidad. *Serie de Apoyo Académico* No. 34 Universidad Autónoma Chapingo. División de Ciencias Forestales. Chapingo, México. 57 p