



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO EN CIENCIAS FORESTALES

IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS PRIORITARIAS PARA RESTAURACIÓN ECOLÓGICA, EN LA REGIÓN CHIGNAHUAPAN-ZACATLÁN, PUEBLA

MARÍA LUISA GONZÁLEZ OVANDO

T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2014

Este estudio fue financiado por la LPI1 “Manejo Sustentable de Recursos Naturales” dentro del proyecto Restauración Ecológica de Áreas Prioritarias en la región de Chignahuapan-Zacatlán, Puebla, del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo.

La presente tesis titulada: **Identificación de áreas prioritarias para restauración ecológica, en la región Chignahuapan-Zacatlán, Puebla**, realizada por la alumna: **María Luisa González Ovando** bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS
POSTGRADO EN CIENCIAS FORESTAL

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERA



DRA. FRANCISCA OFELIA PLASCENCIA ESCALANTE

ASESOR



DR. TOMÁS MARTÍNEZ TRINIDAD

ASESOR



DR. ISIDRO VILLEGAS ROMERO

Montecillo, Texcoco, Estado de México, abril de 2014

IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS PRIORITARIAS PARA RESTAURACIÓN ECOLÓGICA, EN LA REGIÓN CHIGNAHUAPAN-ZACATLÁN, PUEBLA

**María Luisa González Ovando, M.C.
Colegio de Postgraduados, 2014**

Este estudio surge de la necesidad que se presenta en los municipios de Chignahuapan y Zacatlán, estado de Puebla, de restaurar las áreas que han perdido parte de su cubierta vegetal y que como consecuencia han sido degradadas; a pesar de ser una zona importante en el aprovechamiento de recursos forestales en el país, está no se encuentra exenta del aprovechamiento irracional de sus recursos.

Antes de iniciar cualquier trabajo o proceso de restauración, es necesario conocer las zonas en las que se hacen urgentes los trabajos de restauración ecológica, así como los sitios que sirvan como modelo de referencia para fijar las metas y objetivos del proyecto de restauración. Por ello, en este trabajo se realizó la identificación de las áreas prioritarias con fines de llevar a cabo restauración ecológica y además los sitios de referencia potenciales, en los municipios de Chignahuapan y Zacatlán. La identificación de las áreas prioritarias se realizó en un entorno de Sistemas de Información Geográfica (SIG) en combinación con la técnica de Evaluación Multicriterio denominada Proceso Analítico Jerarquizado (PAJ), para definir cinco categorías de prioridad de atención.

Se utilizó información cartográfica de 12 criterios ambientales y se incorporó el conocimiento de 21 expertos y especialistas en el tema de restauración ecológica a través de matrices de comparación pareada. La identificación de los sitios de referencia potenciales, se realizó mediante la clasificación de imágenes de satélite y la exclusión de las áreas con algún tipo de perturbación. Como resultado se obtuvieron dos mapas, uno en donde se muestran las zonas que necesitan atención prioritaria en cuestión de restauración ecológica y otro donde se ubican las zonas que servirán como sitios de referencia para las zonas que se decidan restaurar.

Palabras clave: Restauración ecológica, áreas prioritarias, Evaluación multicriterio, Proceso Analítico Jerarquizado (PAJ), sitio de referencia potenciales

IDENTIFY PRIORITY AREAS FOR ECOLOGICAL RESTORATION IN THE REGION CHIGNAHUAPAN-ZACATLÁN, PUEBLA

This study arises from the need presented in the municipalities of Chignahuapan and Zacatlán, state of Puebla, to restore areas that have lost some of its vegetation cover and have been degraded, despite being an important area in the use of forest resources in the country, is not exempt from the irrational exploitation of its resources.

Before starting a restore process, it is necessary to know the areas where are urgent ecological restoration work, as well as sites that serve as a potential reference sites to set goals and objectives of the restoration project. Therefore, in this study the identification of priority areas was undertaken to carry out ecological restoration and potential reference sites in the municipalities of Chignahuapan and Zacatlán. The identification of priority areas was conducted in an environment of Geographic Information Systems (GIS) in combination with the technique Multi-Criteria Evaluation Analytic Hierarchy Process (AHP) to define five categories of priority attention.

Mapping Information 12 environmental criteria was used and knowledge of 21 experts and specialists in the field of ecological restoration through pairwise comparison matrices was incorporated. Identification of reference sites was performed by classifying satellite images and the exclusion of areas with some type of disturbance. As a result two maps were obtained, the first showing areas that need priority attention within ecological restoration and second areas that serve as reference sites for areas that want to restore.

Key words: Ecological restoration, priority areas, Multicriteria evaluation, Analytical Hierarchy Process (AHP), potential reference site.

AGRADECIMIENTOS

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)**, por el apoyo económico otorgado para realizar mis estudios de posgrado.

Al **Colegio de Postgraduados**, por darme la oportunidad de continuar con mi preparación profesional y contribuir de alguna manera con el desarrollo de nuestro país.

Al **Dr. Rene Valdez Lazalde**, por su contribución en el mejoramiento del presente trabajo y el apoyo brindado.

A mi Consejo particular integrado por la **Dra. Fca. Ofelia Plascencia Escalante**, **Dr. Tomás Martínez Trinidad** y al **Dr. Isidro Villegas Romero**, por el apoyo brindado en el proceso de la investigación.

A tod@s l@s profesionales dedicados al tema de la restauración ecológica, que contribuyeron con sus conocimientos y experiencia, para la realización del estudio.

A todos los **profesores del CP** y en especial a los del Posgrado Forestal, por compartir sus conocimientos y contribuir en mi formación profesional.

A **Juan Espinosa Gonzalez** y **Honoría Chávez González**, por su apoyo brindado en la fase de campo.

A mi familia y al Dr. Vicente Espinosa Hernández, por el apoyo brindado.

CONTENIDO

LISTA DE CUADROS	vii
LISTA DE FIGURAS	viii
Capítulo I. MARCO DE REFERENCIA	1
1.1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.2. OBJETIVOS	3
1.2.1. General	3
1.2.2. Específicos	4
1.3. REVISIÓN DE LITERATURA	4
1.3.1. Importancia y valor del Capital Natural	4
1.3.2. Restauración ecológica	9
1.3.3. Sitios de referencia	17
1.3.4. Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Teledetección	19
1.3.5. Toma de decisiones y Evaluación Multicriterio (EMC)	20
1.3.6. Proceso Analítico Jerarquizado (PAJ)	23
1.4. ÁREA DE ESTUDIO	30
1.4.1. Localización geográfica	30
1.4.2. Aspectos biofísicos y ambientales	32
1.4.3. Aspectos socioeconómicos	41
1.4.4. Problemática ambiental del área de estudio	43
Capítulo II. IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS PRIORITARIAS MEDIANTE EL USO DE SIG Y EVALUACIÓN MULTICRITERIO	47
2.1. INTRODUCCIÓN	47
2.2. OBJETIVOS	48
2.3. MATERIALES Y MÉTODOS	49
2.3.1. Criterios y subcriterios para la identificación de las áreas prioritarias	49
2.3.2. Diseño de base de datos cartográfica	50
2.3.3. Evaluación Multicriterio. Proceso Analítico Jerarquizado (PAJ)	62
2.3.4. Ponderación de los criterios y subcriterios (W)	66
2.3.5. Modelación cartográfica	68
2.3.6. Restricciones	69
2.3.7. Generación del mapa de áreas prioritarias para restauración ecológica	70
2.3.8. Verificación en campo	70
2.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	71
2.5. CONCLUSIONES	77
2.6. RECOMENDACIONES	79

Capítulo III. IDENTIFICACIÓN DE LOS SITIOS DE REFERENCIA POTENCIALES, MEDIANTE TELEDETECCIÓN	80
3.1. INTRODUCCIÓN	80
3.2. OBJETIVOS	81
3.3. MATERIALES Y MÉTODOS	81
3.3.1. Correcciones de las imágenes	81
3.3.2. Clasificación digital de imágenes	82
3.3.3. Validación de la clasificación (Matriz de confusión)	85
3.3.4. Índice Kappa	86
3.3.5. Verificación de campo	86
3.3.6. Identificación de los sitios de referencia potenciales	87
3.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	89
3.4.1. Clasificación de la imagen	89
3.4.2. Validación de la clasificación	90
3.4.3. Índice Kappa	91
3.4.4. Sitios de Referencia potenciales	91
3.5. CONCLUSIONES	94
4. LITERATURA CITADA	96
IV. ANEXOS	104

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Definiciones del concepto Restauración ecológica.	10
Cuadro 2. Escala fundamental del Proceso de Análisis Jerárquico (PAJ).	27
Cuadro 3. Valores del índice aleatorio de consistencia.	30
Cuadro 4. Cifras demográficas del área de estudio.	41
Cuadro 5. Actividades productivas en los municipios de Chignahuapan y Zacatlán.	42
Cuadro 6. Criterios y subcriterios utilizados para la identificación de las áreas prioritarias para restauración ecológica.	49
Cuadro 7. Rangos para definir el grado de erosión (elaboración propia, basado en Gilbert et al., 1997)	58
Cuadro 8. Clasificación de los valores para estandarizar el criterio Clima.	63
Cuadro 9. Clasificación de los valores para estandarizar el criterio Suelo.	63
Cuadro 10. Clasificación de los valores para estandarizar el criterio Topografía.	64
Cuadro 11. Clasificación de los valores para estandarizar el criterio Cobertura vegetal.	64
Cuadro 12. Matriz de comparación pareada del subcriterios Precipitación.	65
Cuadro 13. Valores para estandarizar el subcriterio precipitación	65
Cuadro 14. Matrices de comparación pareada y pesos obtenidos de una encuesta al experto.	67
Cuadro 15. Clasificación (valores) para obtener el mapa de las áreas prioritarias para restauración ecológica.	70
Cuadro 16. Resumen de los resultados de las matrices de comparación pareada y pesos asignados a cada criterio de evaluación.	72
Cuadro 17. Superficie ocupada por prioridad de restauración.	74
Cuadro 18. Matriz de confusión resultante de la clasificación.	90
Cuadro 19. Categoría de concordancias de validación para el coeficiente Kappa	91

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación del capital natural, bajo dos enfoques.	6
Figura 2. Modelo que representa los posibles estados de restablecimiento o mejora de un ecosistema degradado (Fuente: Barrera-Cataño et al., 2010).	13
Figura 3. Clasificación de las técnicas de Evaluación Multicriterio (Fuente: Barredo, 2005 modificado de Jankowski, 1995).	22
Figura 4. Descomposición de un problema en jerarquías (Fuente: Malczewski, 1999).	24
Figura 5. Organización jerárquica de los criterios considerados para obtener las áreas prioritarias a restaurar.	26
Figura 6. Vector de prioridades de los criterios.	28
Figura 7. Matriz de prioridades.	28
Figura 8. Cálculo de la prioridad global.	29
Figura 9. Ubicación del área de estudio (Chignahuapan-Zacatlán).	31
Figura 10. Distribución de los tipos de clima dentro de la región Chignahuapan-Zacatlán.	34
Figura 11. Cuencas y corrientes dentro del área de estudio (Chignahuapan-Zacatlán).	36
Figura 12. Distribución de los tipos de suelo en los municipios de Chignahuapan y Zacatlán.	37
Figura 13: Vegetación y uso del suelo presentes en la región Chignahuapan-Zacatlán.	40
Figura 14. Uso del suelo en los municipios de Chignahuapan y Zacatlán.	43
Figura 15. Superficie afectada por incendios forestales en el estado de Puebla (Fuente: SNIF, 2013).	45
Figura 16. Distribución de la precipitación media anual en el área de estudio (Chignahuapan-Zacatlán).	51
Figura 17. Zonificación de la región Chignahuapan-Zacatlán, de acuerdo al tiempo que permanece húmedo el suelo.	52
Figura 18. Clases textural del suelo, presentes en los municipios de Chignahuapan y Zacatlán.	53
Figura 19. Mapa de profundidad del suelo presente en el área de estudio (Chignahuapan-Zacatlán).	54
Figura 20. Distribución de la permeabilidad del suelo presente en los municipios de Chignahuapan y Zacatlán.	55
Figura 21. Mapa de pendientes presentes del área de estudio (Chignahuapan-Zacatlán).	57
Figura 22. Variación de la tasa de erosión presente en la región Chignahuapan-Zacatlán.	59
Figura 23. Mapa de la cobertura y uso del suelo en el área de estudio (Chignahuapan-Zacatlán).	60
Figura 24. Ubicación de las áreas con presencia de vegetación secundaria en la zona de estudio (Chignahuapan-Zacatlán).	61
Figura 25. Zonificación de la vegetación densa en el área de estudio (Chignahuapan-Zacatlán).	62
Figura 26. Modelo cartográfico para generar el mapa de áreas prioritarias para restauración ecológica.	68
Figura 27. Modelo cartográfico para eliminar las restricciones del mapa de áreas prioritarias.	69

Figura 28. Mapa de áreas prioritarias para restauración ecológica en Chignahuapan y Zacatlán.	73
Figura 29. Vista general de un sitio representativo de Máxima prioridad.	75
Figura 30. Vista general de un sitio representativo de Alta prioridad.	75
Figura 31. Vista general de un sitio representativo de Mediana prioridad.	76
Figura 32. Vista general de las un sitio representativo de Baja prioridad.	76
Figura 33. Vista general de las áreas no prioritarias.	76
Figura 34. Localización de los puntos tomados para generar los sitios de entrenamiento en el área de estudio.	84
Figura 35. Digitalización de los sitios de entrenamiento sobre la imagen de falso color de la zona Chignahuapan-Zacatlán.	84
Figura 36. Ecuación de la fiabilidad global de la clasificación.	85
Figura 37. Superficie con presencia de vegetación boscosa en los municipios de Chignahuapan y Zacatlán.	87
Figura 38. Clasificación supervisada del área de estudio (Chignahuapan-Zacatlán).	89
Figura 39. Áreas con potencial para ser tomadas como sitios de referencia en la región Chignahuapan-Zacatlán.	92
Figura 40. Superficie de los sitios de referencia en los municipios de estudio	93

Capítulo I. MARCO DE REFERENCIA

1.1. INTRODUCCIÓN GENERAL

La destrucción y los daños de los ecosistemas por causas antrópicas comenzaron hace 15,000 años aproximadamente, con el cambio de hábito del hombre de nómada a sedentario, en ese momento los ecosistemas naturales fueron transformados en sistemas agrícolas, pecuarios o urbanos (Barrera-Cataño *et al.*, 2010). Si bien estas transformaciones han contribuido a mejorar la calidad de vida de muchas personas, por otro lado han debilitado la capacidad de los sistemas naturales para brindar otros servicios esenciales para el bienestar de la población, introduciendo además profundas desigualdades ecológico-distributivas entre las distintas regiones del planeta (González *et al.*, 2008).

La degradación ambiental y la consecuente pérdida global de especies tienen su origen en los valores, actitudes y formas de interacción con la biosfera y las características de la sociedad industrial contemporánea, cimentada en la economía de mercado como principal promotor de la conducta humana. Hoy la humanidad no sólo ha alterado enormemente los ecosistemas terrestres sino que se ha apropiado de gran parte del territorio del planeta. Como consecuencia, la vida silvestre permanece relegada a áreas que representan un mínimo porcentaje con respecto a la escala de las actividades y a los precipitados procesos de expansión humana sobre el planeta (Morales y Castaño, 2006).

Exhaustivos estudios sobre la huella ecológica de los seres humanos muestran convincentemente la necesidad cada vez más importante, de la conservación de la naturaleza y la restauración ecológica de los ecosistemas degradados para nuestro bienestar y quizás nuestra propia supervivencia. El aumento demográfico y el aumento de las tasas de consumo per cápita prometen empeorar la situación (Clewell y Aronson, 2007). La importancia de la restauración ecológica se deriva de la existencia generalizada de distintas formas de degradación de los recursos

naturales y las condiciones ambientales, que tienen su manifestación en aspectos tales como la pérdida de vegetación y suelos, aguas contaminadas; contaminación atmosférica; pérdida de recursos genéticos; pérdida o destrucción de partes vitales de hábitat; cambios climáticos, geológicos y evolutivos y en general, el deterioro progresivo de distintos tipos de sistemas: naturales, modificados y cultivados (Gálvez, 2002).

México no está exento de problemas de degradación, de acuerdo con la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), existen entre 130 y 170 millones de hectáreas en condiciones de erosión y 470 mil hectáreas con ensalitramiento. Por otro lado el Inventario Nacional Forestal del año 2000, reportó una tasa de deforestación de entre 370 mil y 1,500 millones de hectáreas por año, es decir entre 0.8% y 2% anual. Se estima que la superficie de bosque templado original del país ha disminuido o se ha deteriorado en al menos 50% y otro tanto ha ocurrido con el 90% de la superficie original en selvas altas (INE *et al.*, 2005).

La restauración ecológica pareciera ser la última opción para la sobrevivencia de nuestra especie y de la vida en general del planeta. Para poderla llevar a cabo el hombre debería cambiar de actitud, darle el verdadero valor a la vida y entender que cada vez son menos las opciones para las generaciones futuras. De alguna manera, se debería desacelerar la tasa de degradación de los ecosistemas; a los ecosistemas no se les puede pedir más de lo que pueden dar naturalmente, ya que de poco sirve hacer restauración ecológica si el deterioro sigue avanzando (Barrera-Cataño *et al.*, 2010).

La restauración intenta dirigir el sistema por una ruta de estadios sucesivos que recuperen la composición de especies y las interrelaciones que tenía la comunidad original en un tiempo relativamente corto. Una restauración ecológica de éxito es aquella que es capaz de acelerar el proceso de sucesión ecológica en un tiempo relativamente corto comparado con otro evento en el que no se haya llevado a cabo

ninguna manipulación (Martínez-Romero, 1996). La restauración ecológica, requiere antes que cualquier otra cosa, una restauración del espíritu, un cambio de actitud frente a lo que es la vida, frente a lo que son los ecosistemas, de parte de la población humana para no dañar o no permitir dañar lo que no se debe, para hacer un buen manejo de lo que es susceptible de ser afectado, o para restablecer lo que se ha degradado (Barrera-Cataño *et al.*, 2010).

Los recursos naturales en el área de estudio, correspondientes a la Sierra Norte del estado de Puebla, en especial en los municipios de Chignahuapan y Zacatlán, los recursos naturales no se han aprovechado racionalmente y como consecuencia se ha perdido una gran parte del horizonte superior de los suelos y de la vegetación que ahí subsistía (Rojas, 2011). Derivado de lo anterior, es de vital importancia identificar las áreas degradadas para llevar a cabo la restauración ecológica de la región.

En el presente trabajo, se emplearon los programas de análisis espacial IDRISI Selva y ArcGis 10.1, para elaborar el Sistema de Información Geográfica (SIG) combinado con técnicas de Evaluación Multicriterio (EMC), lo que permitió identificar las áreas con necesidad de ser restauradas, así como su prioridad. Estas son herramientas que recientemente han destacado por su utilidad en el mapeo y análisis de la aptitud de la tierra. Siendo los métodos de EMC, capaces de integrar distintos tipos de variables, con diferentes niveles de precisión espacial, y de atender los compromisos implicados en la decisión explícita (Geneletti *et al.*, 2011).

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. General

Identificar las áreas con necesidad de ser restauradas ecológicamente y asignarles un nivel de prioridad de atención, en los municipios de Chignahuapan y Zacatlán del estado de Puebla, lo que servirá como paso inicial en cualquier proyecto de restauración ecológica que se lleve a cabo en la zona.

1.2.2. Específicos

- Definir las áreas que por sus características físicas y ambientales necesitan ser restauradas, y clasificarlas de acuerdo al nivel de prioridad para su atención, con la finalidad de que los recursos designados a estas prácticas sean aplicados en las áreas adecuadas y de manera eficiente.
- Identificar las áreas que servirán como referencia en futuros trabajos de restauración en las áreas definidas como prioritarias, con la finalidad de definir las metas y objetivos del proyecto.
- Generar la cartografía y el sistema de información geográfica de la zona, para la identificación de áreas prioritarias para restauración ecológica.

1.3. REVISIÓN DE LITERATURA

1.3.1. Importancia y valor del Capital Natural

El concepto de capital natural se formalizó a principios de los años 90 con base en trabajos desarrollados en los campos de la economía ambiental y la economía ecológica, y a la mención explícita del concepto en la obra de Schumacher en 1973, que lo utilizó en referencia a los combustibles fósiles. Sin embargo, podemos encontrar alusiones al concepto de capital natural desde hace más de un siglo, cuando Walras en el siglo XIX mencionó a las tierras como “capitales naturales y no artificiales o producidos”. También en la obra de Vogt de 1948 (citado por Gómez y de Groot, 2007), se intuye el uso del concepto, cuando señalan que al consumir nuestro verdadero capital, el de los recursos naturales, reducimos la posibilidad de que algún día consigamos pagar la deuda que hemos contraído con la naturaleza.

El capital natural fue definido por Costanza y Daly (1992) como “todo stock de la naturaleza que genera un flujo de bienes y servicios útiles o renta natural a lo largo del tiempo”. Partiendo de este concepto surgieron otros, dado que el capital natural no puede ser concebido como un simple stock ó agregación de elementos. A parte

de estos componentes (estructura del ecosistema), el capital natural engloba todos aquellos procesos e interacciones entre los mismos (funcionamiento del ecosistema) que determinan su integridad y resiliencia ecológica (Gómez y de Groot, 2007).

Otra forma de definir el capital natural es, “todo aquello que no ha sido hecho por el hombre y que proporciona la materia prima para todo lo que éste crea, además de ser la fuente de todos los servicios ambientales”. Este capital, aporta en forma importante a la calidad de vida humana, generando y regenerando la vida, proporcionando recursos, reciclando desechos y proveyendo entretenimiento (Collados, 1999). Así mismo, Clewell y Aronson (2007) definen el capital natural como “el activo fundamental en la que todas las sociedades humanas y economías dependen”. Los flujos de bienes y servicios naturales que se derivan de estas poblaciones del capital natural, es equivalente a los intereses que se acumulan al capital financiero.

Por ello, en la actualidad los ecosistemas funcionales son considerados como un “capital natural” o lo que es lo mismo, un stock de componentes bióticos, geóticos y procesos biofísicos, capaz de auto-mantenerse y suministrar una renta natural a lo largo del tiempo. Este proceso es una forma de flujo de servicios que, adecuadamente gestionado, genera una serie de servicios esenciales para el bienestar y el desarrollo de las sociedades humanas. Sin embargo, también incluye los paisajes culturales de los cuales obtenemos servicios y productos (bienes) que permiten nuestro sustento y bienestar sin costos directos de producción (Aronson *et al.*, 2007; González *et al.*, 2008).

Según Costanza *et al.* (1997), el capital natural puede tomar formas tangibles (árboles, minerales, ecosistemas, el ambiente, etc.) e intangibles (información tal como la almacenada en computadoras, etc.). Siendo el capital natural un concepto muy amplio, distintos autores lo han clasificado de acuerdo a ciertas características (Figura 1).

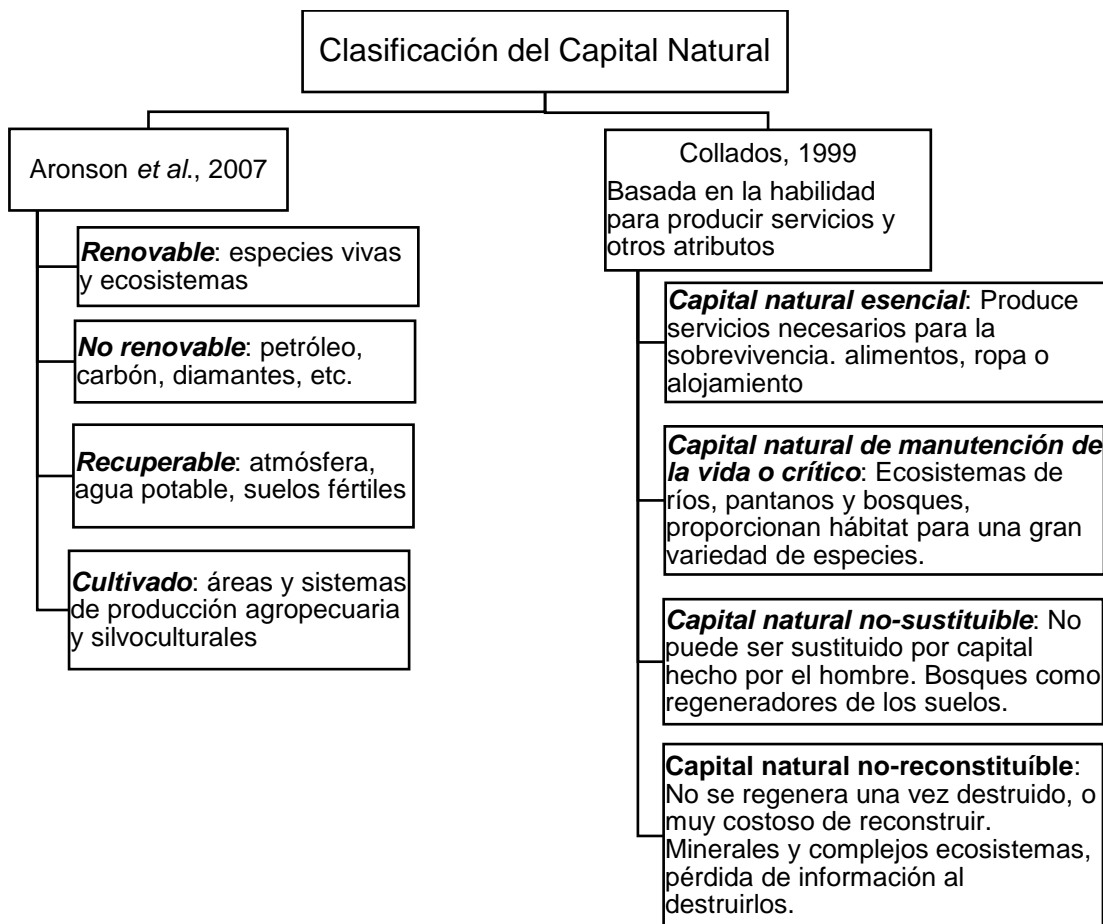


Figura 1. Clasificación del capital natural, bajo dos enfoques.

El término capital natural surge a partir de los años 70, al calor de acontecimientos como la crisis del petróleo, el informe Meadows sobre los límites del crecimiento, la Conferencia de Estocolmo y la preocupación sobre el cambio climático y sus efectos devastadores (Gómez y de Groot, 2007), reconociéndose la importancia del vínculo entre la ecología y la economía, fundamento básico para interpretar la actual crisis ecológica, así como la formulación de posibles soluciones. El despertar de la conciencia ecológica pondría en evidencia las carencias de la teoría económica a la hora de considerar límites al crecimiento económico y de incorporar el deterioro ecológico dentro de su marco analítico (Aronson *et al.*, 2007).

A lo largo de las últimas tres décadas, enfoques como la economía ambiental y la economía ecológica han tratado de volver a conectar el sistema económico con el

sistema ecológico que lo sustenta. La separación entre el capital natural y capital cultural ha conducido a una destrucción indiscriminada de la fuente de servicios ambientales: el capital natural (Collados, 1999; Gómez y de Groot, 2007). Ante esta separación y los problemas ecológicos globales, se ha considerado urgente “asignar valor monetario a las poblaciones biológicas afectadas o a aquellas variedades, especies y ecosistemas de interés para proceder a incorporarlos en el mercado a través de precios que permitan realizar análisis de costo-beneficio y de oferta y demanda para tomar decisiones de manejo adecuadas” (Morales y Castaño, 2006).

El concepto de funciones de los ecosistemas ofrece el puente de conexión entre la ecología y la economía, al hacer referencia a la capacidad ecológica de sustentar la actividad económica, y es una herramienta conceptual clave para poder desarrollar una teoría del capital natural con base ecológica. La conceptualización de los ecosistemas y sus procesos en términos híbridos como capital natural, funciones o servicios, supone una adaptación de determinados conceptos de la ecología al lenguaje que en la actualidad domina la toma de decisiones, el económico (Gómez y de Groot, 2007). En términos económicos, el capital natural representa las reservas, ganancias e intereses generados a partir de los bienes naturales, es decir, los flujos de bienes y servicios de los cuales dependen las sociedades y economías para su supervivencia (Aronson *et al.*, 2007). Sin embargo, la valoración económica de un ser vivo no tiene en cuenta su valor inherente o reduce el valor de existencia de un individuo, población, comunidad o especie, a un precio surgido del análisis costo-beneficio. Dicha visión simplifica y reduce a costos económicos las interacciones que ocurren en los sistemas que sustentan la vida en el planeta. Una forma de pensar en el valor de los servicios ambientales es determinar lo que costaría y replicarlas en una producción tecnológica (Costanza *et al.*, 1997; Morales y Castaño, 2006).

A nivel global, el capital natural es extraído, en la mayoría de los casos, sin consideración de su habilidad para proveer servicios ambientales, obteniéndose indiscriminadamente de todas las categorías del capital natural. Esta práctica conduce a un uso errático del capital natural que puede ser no sustentable. Cero

capital natural implica cero bienestar humano, ya que no es factible sustituir, en su totalidad al capital natural con un capital "no natural" (Costanza *et al.*, 1997; Collados, 1999).

Los cambios generados en el capital natural pueden alterar dramáticamente los ecosistemas terrestres y acuáticos, lo cual genera un impacto sobre el bienestar humano y los costos de las actividades humanas locales. La degradación ambiental es tratada como una consecuencia marginal, y el capital natural es visto sólo como una fuente de recursos, no es reconocido como un componente esencial de un sistema ecológico que tiene un valor *per se*, o como una fuente de producción de servicios ambientales, cultura y espacio social (Costanza *et al.*, 1997; Collados, 1999). La regla de conservación de este capital es que la disponibilidad de recursos se mantenga constante, los servicios ambientales son también determinantes de la habilidad del capital natural para regenerarse. El capital natural es un patrimonio que debemos conocer cabalmente para valorarlo, utilizarlo y conservarlo adecuadamente en beneficio de todos, del presente y del futuro (Collados, 1999; Sarukhán *et al.*, 2009).

Así mismo, el desarrollo económico y social dependerá en el largo plazo del adecuado mantenimiento de los sistemas ecológicos que los sustentan, y que constituyen el capital natural del planeta. La sostenibilidad de las economías está supeditada a la sostenibilidad de los ecosistemas que las engloban, por ello, el objetivo principal de una comunidad que camine por la senda de la sostenibilidad sería gestionar adecuadamente el capital con que cuenta para su desarrollo (Gómez y de Groot, 2007; González *et al.*, 2008).

En México, el capital natural representa un gran potencial para el desarrollo y la generación de beneficios para toda la población. A pesar de ello, históricamente hablando, las políticas de utilización de los recursos naturales no han favorecido la conservación de ese capital, ni su uso sustentable, y tampoco han mejorado el bienestar social de quienes viven en y de ese capital. Este es un recurso que no

podremos recuperar una vez que lo hayamos destruido; el conocimiento de ese capital debe ser creado en nuestro país, sobre todo por nuestra propia gente, ya que tampoco lo podremos importar de otros países o regiones (Sarukhán *et al.*, 2009). De hecho, en la actualidad a nivel mundial, se pretende generar mejores opciones para la comprensión de las nuevas concepciones de la relación “ser humano/naturaleza”, en las cuales el marco teórico del manejo del capital económico puede ser tomado como un modelo que facilite la persistencia del capital natural (Aronson *et al.*, 2007).

1.3.2. Restauración ecológica

La restauración ecológica surge a partir de que la sociedad reconoce las consecuencias del deterioro de los sistemas naturales. Sin embargo, la restauración ecológica no es nueva, desde tiempos remotos, los grupos humanos han ayudado a la recuperación de sitios degradados con la finalidad de mantener la disponibilidad de los bienes brindados por los ecosistemas, así como para lograr beneficios de carácter estético y recreativo (INE *et al.*, 2005). A mediados de la década de los 70's hubo una creciente comprensión de la disciplina que iba a ser llamada restauración, era un nuevo enfoque para frenar las tendencias de pérdida de hábitat, diversidad biológica y las áreas naturales. En la primera conferencia anual de la Sociedad para la Restauración Ecológica y Gestión (ahora la Sociedad para la Restauración Ecológica Internacional) celebrada en Oakland, California en 1989, el término restauración ecológica y la emergente disciplina del mismo nombre quedaron consolidados (Clewel y Aronson, 2007).

La restauración ecológica se define como “el proceso de ayudar al restablecimiento de un ecosistema que se ha degradado, dañado o destruido por causa de los diferentes disturbios naturales y antrópicos” (SER, 2004). Esta definición es la más aceptada y difundida, ya que ha sido consensada por varios expertos en la materia, como por ejemplo Hobbs y Cramer (2008). Siendo esté un tema controversial, existen una serie de definiciones, algunas de ellas se presentan en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Definiciones del concepto Restauración ecológica.

Autor (es)	Definición de Restauración Ecológica
Hobbs y Norton (1996) citados por INE <i>et al.</i> , 2005	Rehabilitación de aquellos ambientes que se encuentran degradados y restablecerlos a sus condiciones naturales originales o, si esto no es posible, crear otras que sean similares al hábitat afectado y que compensen aceptablemente los daños causados
SER (2002) citados por INE <i>et al.</i> , 2005	Intervención de los grupos humanos sobre los ecosistemas que han sido degradados, dañados, transformados o destruidos, para facilitar su recuperación
MAVDT (2003)	Aplicación de técnicas y estrategias tendientes al restablecimiento parcial o total de la estructura y función de los ecosistemas disturbados
INE <i>et al.</i> (2005)	Práctica de acciones orientadas a propiciar una trayectoria de restablecimiento de un ecosistema previamente alterado, en compatibilidad con las condiciones actuales y con la historia biológica del entorno, tal que enfatice una recuperación significativa de sus atributos originales de composición taxonómica, de rasgos estructurales y de funciones generales
MAVDT (2007)	Conjunto de actividades realizadas y conectadas de forma intencional, a través de las cuales se inicia o acelera la recuperación de un ecosistema con respecto a su salud, integridad y sostenibilidad, teniendo como parámetro de referencia un ecosistema equivalente donde no ha ocurrido el disturbio que generó las condiciones a ser reparadas
Barrera y Valdés (2007)	Proceso de asistir el recubrimiento de un ecosistema que ha sido degradado, dañado o destruido, teniendo como objetivo el restablecimiento de la función y la estructura de las áreas que han sido disturbadas, utilizando como referencia los ecosistemas predisturbio

El trabajo realizado por Aldo Leopold (1935), en una pradera de la Universidad de Wisconsin-Madison, que intentó recuperar la vegetación original mediante el recubrimiento con especies vegetales nativas que, a su vez, ayudaría a estabilizar los suelos erosionados, se puede considera como el inicio formal de los trabajos de restauración. Sin embargo, el desarrollo de la restauración se ha intensificado recientemente, a partir de que los efectos del abuso (ocasionado por las demandas de la población, que creció explosivamente en la segunda mitad del siglo XX) se consideraron preocupantes y de trascendencia global (INE *et al.*, 2005).

El propósito de la restauración ecológica es lograr la sostenibilidad de los ecosistemas que fueron deteriorados por actividades humanas, para ello se debe restablecer su salud e integridad. Así mismo, una de las principales metas es tratar de revertir, reducir (o eliminar, si es posible) en forma significativa, los procesos de

deterioro y factores de perturbación de origen no natural (INE *et al.*, 2005; Barrera-Cataño *et al.*, 2010).

A pesar de lo expuesto anteriormente, el objetivo de la restauración ecológica no puede ser el regresar un ecosistema al punto exacto en el que se hallaba antes de la alteración, sino propiciar que éste asuma una trayectoria de reparación (tanto como sea posible) con los rasgos generales del entorno. Esto debido a que la diversidad actual en todas sus manifestaciones (genes, organismos, poblaciones, comunidades, ecosistemas), es consecuencia de los caminos seguidos por la evolución biológica en cada lugar. Por esa razón es muy poco probable que las circunstancias ecológico-evolutivas de un ecosistema previas a eventos de deterioro, se repitan exactamente (INE *et al.*, 2005).

Con base en lo anterior, la restauración ecológica cuenta con niveles o etapas según el estado del área que se va a intervenir, el objetivo y el resultado final del proyecto. Se tiene una amplia gama de actividades que van desde el de devolver una copia exacta de lo existente en el ecosistema y todas sus especies a una zona degradada, reaparecer algún tipo de funcionamiento de los ecosistemas o simplemente lograr el objetivo básico de regresar algún tipo de vegetación para controlar la erosión (MAVDT, 2003; Hobbs y Cramer, 2008). A continuación se describen los niveles o tipos de restauración:

Restauración pasiva: Deja que el ecosistema se recupere por sí mismo y sin ayuda del hombre, se aplica cuando la perturbación no es muy grave, capitalizando la resiliencia inherente del sistema. Puede ser la manera más eficaz y rentable de restaurar el sistema (Bradshaw, 1996; INE *et al.*, 2005; Hobbs y Cramer, 2008).

Rehabilitación (rehabilitation): Estrategia encaminada a la recuperación parcial del ecosistema que busca el restablecimiento de algunos de los elementos funcionales o estructurales del sitio, pero sin llegar a recuperar los atributos originales. Lo fundamental es el restablecimiento de procesos ecológicos esenciales que permitan que el ecosistema sea autosostenible. Es decir, se reemplaza el ecosistema

degradado por otro que presta otros servicios diferentes al de la conservación de las especies y del sistema en general, tales como: la oferta de maderas y otras materias primas, recreación pasiva, regulación hídrica, regulación de la erosión y almacenamiento de la materia orgánica (Bradshaw, 1996; MAVDT, 2003; SER, 2004; Barrera-Cataño *et al.*, 2010).

Recuperación (reclamation): Designa la conversión de tierras percibidas como inútiles a una condición productiva. El propósito es restablecer las áreas degradadas y dañadas ecológicamente para que presten servicios diferentes al de la conservación (aunque no necesariamente), tales como: recreación activa y pasiva, uso agrícola y pecuario, oferta de materias primas, entre otros. Por lo general, el sistema final recuperado no es autosostenible y es diferente al predisturbio. Consiste en restaurar por lo menos algunas de las especies dominantes originales y ciertas funciones del ecosistema (Bradshaw, 1996; MAVDT, 2003; Clewell y Aronson, 2007; Barrera-Cataño *et al.*, 2010).

Saneamiento: Se aplica en sitios severamente degradados por actividades agresivas (como las minas a cielo abierto), a los cuales se pretende dar un uso diferente al original que causó el daño, aunque en algunos casos puede tomarse como un primer paso en un proyecto de restauración, o bien dentro de una rehabilitación (INE *et al.*, 2005).

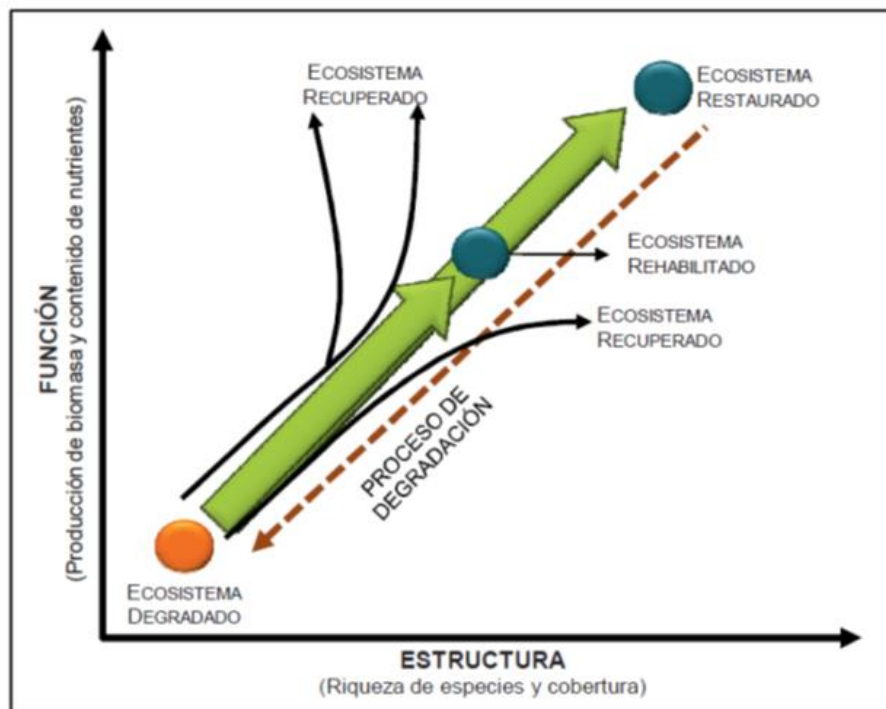
Reemplazamiento vegetal: Proceso por el que se induce la formación de un ecosistema diferente al original, aunque pueda encontrarse fuera de su ámbito histórico de distribución y en condiciones distintas a las presentadas en forma natural; sin embargo, en este caso no se considera el efecto que este proceso pueda tener sobre los remanentes de vegetación nativa o sobre los ecosistemas locales supervivientes (INE *et al.*, 2005).

Recubrimiento vegetal o revegetación: Es un componente de la recuperación y consiste en el establecimiento de sólo una o unas pocas especies, implica sólo el

reforzamiento de algunos procesos como la sucesión vegetal, la productividad, la ecología del suelo, la incorporación de nutrientes, entre otros. Se busca que el sistema regrese por sí sólo a su estado original utilizando especies nativas para el recubrimiento (SER, 2004; INE *et al.*, 2005).

Restauración completa: Es la restauración ecológica propiamente dicha, consiste en llevar al ecosistema degradado a una condición semejante o parecida a la de predisturbio, con su composición de especies, estructura y funciones originales, la regulación hídrica, la regulación de la erosión y el almacenamiento de la materia orgánica, mediante un programa activo de modificación del sitio y de reintroducción de las especies. El sistema final debe ser autosostenible (INE *et al.*, 2005; Barrera-Cataño *et al.*, 2010).

En la Figura 2, se muestra de manera esquemática los tres principales procesos de restauración, respecto a la función y estructura del ecosistema.



Modificado de Bradshaw (1987)

Figura 2. Modelo que representa los posibles estados de restablecimiento o mejora de un ecosistema degradado (Fuente: Barrera-Cataño *et al.*, 2010).

La importancia de la restauración ecológica se deriva de la existencia generalizada de distintas formas de degradación de los recursos naturales y las condiciones ambientales. La degradación tiene su manifestación en aspectos tales como la pérdida de vegetación y suelos, aguas contaminadas; contaminación atmosférica; pérdida de recursos genéticos; pérdida o destrucción de partes vitales de hábitat; cambios climáticos, geológicos y evolutivos y en general, el deterioro progresivo de distintos tipos de sistemas: naturales, modificados y, cultivados (Gálvez, 2002).

Si bien la migración ha sido una salida empleada por la humanidad en toda su historia para enfrentar el deterioro de sus recursos, el espacio disponible es cada vez menor, de manera que la restauración de ecosistemas se hace socialmente necesaria. Cuando se pretende emprender un proyecto de restauración, se necesita considerar los cambios que enfrentará la sociedad en su estilo de vida, a partir del inicio del proyecto y a largo plazo (INE *et al.*, 2005). La restauración ecológica fomenta, y quizás hasta depende de la participación a largo plazo de la población local, por lo que es necesario involucrar a la sociedad en todas las fases de desarrollo, ya que si no se cuenta con la participación de la población, éste no se podrá mantener y lograr las metas y objetivos planteados (SER, 2004; CCP, 2007).

Debido a los recursos escasos que generalmente se destinan a proyectos de restauración, es conveniente determinar los ecosistemas que necesitan ser restaurados de manera prioritaria. Solo se requiere restaurar un ecosistema cuando, ha sido alterado más allá de su resiliencia máxima y en escenarios donde las perturbaciones naturales o humanas han generado un cambio drástico en la cobertura del suelo de tal forma que se inhiba el proceso de regeneración (INE *et al.*, 2005).

Algunas de las razones importantes que según Barrera-Cataño *et al.*, (2010) deben tomarse en cuenta para definir si un sistema degradado debe ser o no restaurado son:

- Los daños que pueden generar a los sistemas vecinos
- Ausencia de representatividad ecológica de los ecosistemas originales
- Importancia del sitio en términos paisajísticos (valor escénico)
- Importancia en términos de generación de bienes y servicios ambientales

La restauración ecológica no es el solo hecho de plantar especies vegetales en un sitio o de reintroducir especies animales; por el contrario, es un proceso de emulación de estadios de sucesión de distintas comunidades biológicas conocidas en un sitio, hasta lograr que éstas tomen una trayectoria autónoma y viable de establecimiento permanente en el lugar (INE *et al.*, 2005).

Se espera que un proyecto de restauración se inicie con el planteamiento de interrogantes como: ¿Qué se quiere restaurar?, ¿Cómo se va a lograr?, ¿Cómo saber sí se está logrando? Así mismo, una de las primeras acciones a realizar es identificar el ecosistema que servirá de referencia para guiar el proceso de restauración, es decir, un ecosistema menos alterado de un sitio existente lo más similar posible al ecosistema original del sitio a restaurar, en donde puedan encontrarse los rasgos funcionales y estructurales que se quieren reconstruir (MAVDT, 2003; SER, 2004).

La biodiversidad nativa de cada área también se debe considerar, de manera que se devuelva en lo posible el potencial ecológico y evolutivo anterior a los daños causados a ecosistemas locales (INE *et al.*, 2005). Para obtener mejores resultados de restauración, es necesario el uso exclusivo de materiales locales, dado que las especies/poblaciones locales están mejor adaptadas al entorno, se encuentran dentro de su hábitat natural, se mantiene la integridad genética del sitio y se evita la contaminación del patrimonio genético local (Harris *et al.*, 2006).

El régimen de disturbio que ha ocasionado su degradación es un factor a considerar con el ánimo de tomar las mejores decisiones al momento de implementar las

estrategias de restauración (Barrera-Cataño *et al.*, 2010). No se debe olvidar, que la restauración ecológica no sólo consiste en la restauración de los ecosistemas, sino también del desarrollo de los usos humanos de las áreas que estén en armonía con el medio ambiente. En muchos sentidos, el producto final más importante de la restauración no es sólo un ecosistema sano, sino una relación sana entre los seres humanos y los ecosistemas (Moore *et al.*, 1999; Allison, 2004).

Los ecosistemas restaurados no pueden ser réplicas estáticas del pasado, como si fueran pinturas, estos responden continuamente a la expresión biótica, a sus procesos internos propios y a las condiciones en el entorno externo siempre cambiante (Clewell y Aronson, 2007). Para verificar si se están obteniendo los efectos deseados de la restauración ecológica, se requiere disponer de una idea mínima acerca de la trayectoria esperada del ecosistema en restauración. Las trayectorias pueden depender de situaciones locales propias de la región (y de factores aleatorios), así como de los métodos para propiciarla. Un elemento importante es el monitoreo de los proyectos de restauración, ya que se aporta una visión objetiva y realista del destino final de las inversiones financieras de los planes y programas (MAVDT, 2003; INE *et al.*, 2005).

Un ecosistema se considera restaurado y/o recuperado cuando contiene suficientes recursos bióticos y abióticos para continuar su desarrollo sin ayuda. Dicho ecosistema podrá mantenerse tanto estructural como funcionalmente, además de demostrar capacidad de recuperación dentro de los límites normales de estrés y alteración ambiental e interactuar con ecosistemas contiguos en términos de flujos bióticos y abióticos e interacciones culturales (SER, 2004). Aunque esta meta puede ser apropiada, en algunos casos, es poco realista y tal vez no deseable, ya que el éxito o fracaso de los proyectos de restauración depende del establecimiento de objetivos claros y realista, con el fin de evaluar en forma precisa el éxito de la de la restauración. El logro de los objetivos se verificará sí los valores de los atributos medidos en el área en restauración se asemejan a los de un área de referencia (MAVDT, 2003; Hobbs y Cramer, 2008).

La restauración ecológica se utiliza cada vez más como una herramienta para responder y adaptarse a los cambios previstos en el clima regional y mundial (Harris *et al.*, 2006). A pesar de ello, las medidas preventivas deben ser consideradas siempre en primer lugar, mientras que la restauración no debe ser utilizada como una excusa para el daño o la destrucción de los ecosistemas (Hobbs y Cramer, 2008). Actualmente existen diferentes organismos dedicados a restaurar los ecosistemas, algunos de ellos se muestran en el Anexo 1.

1.3.3. Sitios de referencia

Un proyecto de restauración ecológica comienza con la visión de cómo un ecosistema o paisaje alterado parecería si fuera restaurado o bien, recordar la forma en que el ecosistema se veía y funcionó en algún período de tiempo antes de que fuera degradado, dañado o destruido. A esta visión se le denomina el modelo o sitio de referencia, éste puede consistir en uno o más ecosistemas intactos o lo menos perturbados posible, los cuáles se esperan emular cuando se realiza una restauración. También el modelo de referencia puede consistir, en descripciones de estos ecosistemas o de las expresiones ecológicas sobresalientes que se desean al restaurar un ecosistema (Clewell y Aronson, 2007). De acuerdo con la SER (2004), un ecosistema de referencia puede servir de modelo para la planificación de un proyecto de restauración ecológica y posteriormente, servir en la evaluación de ese proyecto, dado que se espera que con el tiempo el ecosistema restaurado emulará los atributos de la referencia, y se desarrollarán las metas y estrategias del proyecto de acuerdo con esas expectativas.

Es importante tener en cuenta que muchas veces no existe un único sistema de referencia, ya que el área que se encuentra “mejor conservada” presenta características diferentes a nuestro sistema disturbado, por encontrarse en una etapa sucesional superior. Por lo cual, también lo más recomendado es recopilar la información de varias áreas aledañas y “bien conservadas” que puedan dar

realmente una referencia de lo que era el área antes del disturbio (Barrera-Cataño *et al.*, 2010). Por lo tanto, una sola referencia es una expresión inadecuada de la constelación de posibles estados y de la gama histórica de variaciones expresadas por el ecosistema restaurado; por lo que, es mejor usar como referencia un agregado de múltiples sitios de referencia (SER, 2004).

La elección de la referencia depende del estado sucesional del área tratada y de la cantidad de tiempo disponible para el monitoreo. Es indispensable que el referente se encuentre bajo condiciones ambientales similares como la altitud, pendiente, u orientación (MAVDT, 2003). De tal manera que el contenido y la calidad de la referencia puede variar ampliamente entre los proyectos, dependiendo de la disponibilidad de información y sitios en los que se puede desarrollar (Clewell y Aronson, 2007).

Las fuentes de información que se pueden usar para describir una referencia incluyen (SER, 2004):

- Descripciones ecológicas, listas de especies y mapas del sitio del proyecto antes del daño
- Fotografías históricas y recientes, tanto aéreas como terrestres
- Remanentes del sitio que se ha de restaurar que indiquen las condiciones físicas anteriores y la biota
- Descripciones ecológicas y listas de especies de ecosistemas similares e intactos
- Especímenes de herbarios y museos
- Versiones históricas e historias orales de personas familiarizadas con el sitio del proyecto antes del daño

Sin importar lo imperfecta que sea una referencia, es una herramienta valiosa para guiar la restauración. Sin una referencia como objetivo, un proyecto de restauración carece de sentido y probablemente, ni siquiera debería calificarse como de restauración ecológica. El modelo de referencia, distingue a las acciones de restauración ecológica en un sentido holístico de otros tipos de actividades

ambientales. Al finalizar el proyecto, la referencia sirve como base para la evaluación del proyecto (Clewel y Aronson, 2007).

1.3.4. Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Teledetección

Los orígenes de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la teledetección siguieron una trayectoria paralela. Ambas técnicas surgieron como disciplinas independientes, sólo unidas por su orientación medioambiental (Chuvienco, 2008). Los SIG han sido definidos de diversas formas, en general, podemos decir que hoy en día hay múltiples definiciones de lo que es un SIG y probablemente ninguna totalmente satisfactoria, por lo que cada uno puede elegir la que más se aproxime al contexto en el que se está utilizando (Barredo, 2005).

En este sentido, un SIG se define como un conjunto de hardware, software, datos geográficos y personal capacitado, organizados para capturar, almacenar, consultar, analizar y presentar todo tipo de información que pueda tener una referencia geográfica, siendo éste una base de datos espacial (Puerta *et al.*, 2011).

Chuvienco (2008) define la teledetección como la “técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores aéreos o espaciales, asumiendo que entre el suelo y el sensor existe una interacción energética, ya sea por reflexión de la energía solar o de un haz energético artificial, o por emisión propia”. Durante los años 60's, esta técnica se convirtió en una fuente más de información ambiental, incrementándose este planteamiento con el desarrollo de las técnicas de interpretación. A principio de los años 80, se comienza a considerar la teledetección como auxiliar de un SIG. Las ventajas de la teledetección como fuentes de datos para un SIG se centran en la obtención de algunas variables de interés, y en la actualización de información ya generada.

El uso de las tecnologías a distancia, como sensores y SIG en conjunto han revolucionado nuestra capacidad para definir mapas de los patrones de distribución de la vegetación, la estimación de las tasas de pérdida de vegetación, evaluar el estado de los bosques y los servicios ambientales que prestan los bosques, entre otros (Newton, 2007). Adicional a lo anterior, los SIG son una potente herramienta de ayuda para la planificación cuando se dispone de una base de datos suficientemente amplia para los fines que se plantean. En este sentido, ciertas técnicas que eran ajenas a los SIG empiezan a ser integradas en estos sistemas con el fin de buscar soluciones a determinadas cuestiones de índole espacial, entre estas técnicas se encuentran las derivadas de la teoría de decisiones, como la Evaluación Multicriterio (EMC) (Barredo, 2005).

1.3.5. Toma de decisiones y Evaluación Multicriterio (EMC)

La teoría de la decisión se ocupa de la lógica por la cual se llega a una opción entre alternativas, las cuáles varían dependiendo del problema que se trate. En el contexto de SIG, es útil distinguir entre decisiones de políticas y decisiones de asignación de recursos; está última incluye decisiones que afectan directamente la utilización de recursos (suelo, agua, etc.), mientras que la primera sólo pretende influir el comportamiento decisivo de otros quienes a su vez harán compromisos con los recursos. Los SIG poseen un potencial considerable en ambos campos (Eastman, 2012).

Cada vez más, los SIG se utilizan como una ayuda importante en la toma de decisiones espaciales. Recientemente la evolución de los SIG han tenido mejoras significativas en su capacidad para el proceso de toma de decisión en la distribución de tierras y el manejo ambiental, entre las cuáles la evaluación multicriterio es uno de los procedimientos más importantes (Hong y Eastman, 2000). Las técnicas de Evaluación Multicriterio (EMC) apoyan la solución de un problema de toma de decisiones, evaluando las alternativas desde diferentes perspectivas, y analizando su robustez con respecto a la incertidumbre. Su fin básico es investigar un número finito

de alternativas de decisión y elegir la mejor bajo la luz de múltiples criterios y objetivos en conflicto, lo cual hace posible generar soluciones compromiso y jerarquizar las alternativas de acuerdo a su grado de atracción (Barredo, 2005; Geneletti *et al.*, 2011).

Una EMC en un ambiente SIG se convierte en una Evaluación Multicriterio Espacial, la cual es un procedimiento que sirve para identificar y comparar soluciones a un problema espacial, basado en la combinación de múltiples factores que pueden ser, al menos parcialmente, representados por mapas. Dicho de otra manera, es un proceso donde los datos geográficos se combinan y se transforman en una decisión, implica la entrada de datos, las preferencias del tomador de decisiones y la manipulación de la información usando reglas especificadas de la decisión (Geneletti *et al.*, 2011).

Para ello, se requiere una articulación de los objetivos del tomador de decisiones y una identificación de los atributos útiles para indicar el grado con que estos objetivos se logran; además, éstos forman una estructura jerárquica de criterios de evaluación para un problema particular de toma de decisiones (Malczewski, 1999). En términos generales el proceso involucra los siguientes componentes:

- Meta o conjunto de metas de la toma de decisiones (intereses de grupos) y esfuerzo para lograrla
- El tomador de decisiones o grupo involucrado en el proceso de la toma de decisiones con las preferencias respecto a cada criterio en evaluación
- Conjunto de criterios de evaluación (objetivos y/o atributos) en base a los cuales los tomadores de decisiones evalúan alternativas
- El conjunto de alternativas de decisión, que son las decisiones o las variables de acción
- Conjunto de variables no controlables o estados naturales (decisión ambiental)
- Conjunto de resultados o consecuencias asociados con cada alternativa o par de atributos.

Los distintos métodos de EMC se diferencian básicamente en los procedimientos aritmético-estadísticos que realizan sobre las matrices de evaluación y de

prioridades, con lo cual se obtiene una evaluación final de las alternativas (Jankowski, 1995). En relación a esto, los métodos de EMC se clasifican en dos grupos de técnicas: compensatorias y no compensatorias (Figura 3).

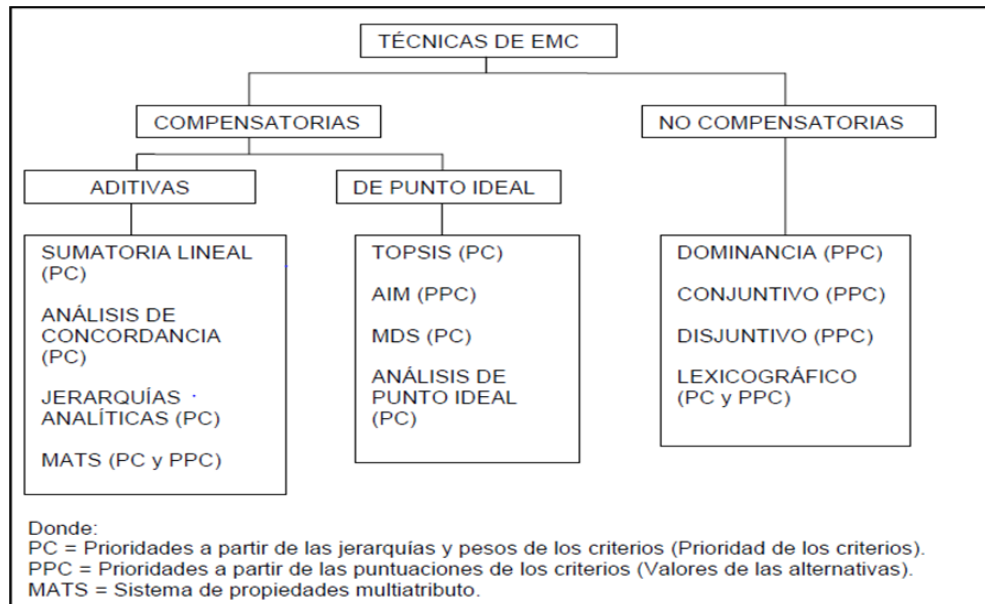


Figura 3. Clasificación de las técnicas de Evaluación Multicriterio (Fuente: Barredo, 2005 modificado de Jankowski, 1995).

Las técnicas compensatorias requieren un proceso cognitivo mayor, requieren que el tomador de decisiones especifique los pesos de los criterios como valores cardinales o funciones de prioridad. Se deben establecer los pesos de los criterios (w) de manera numérica en escala de razón, lo que puede llevarse a cabo a través de algún procedimiento definido para tal fin. Por otro lado, en las técnicas no compensatorias se necesita un menor proceso cognitivo, dado que éstas por lo general requieren una jerarquización ordinal de los criterios basada en las prioridades del tomador de decisiones. En este grupo los procedimientos se pueden llevar a cabo indicando un valor ordinal o bien, el orden de importancia de los criterios, sin establecer un peso de manera cuantitativa (Jankowski, 1995).

La modelación multicriterio se ha utilizado en numerosos estudios de resolución de conflictos ambientales (Malczewski, 1999), debido a que estas técnicas permiten integrar de manera sistemática y rigurosa información de cualquier tipo tangible e

intangibles, dado que los algoritmos en los que se basa hacen posible considerar en forma participativa y fundamentada cada uno de los factores, procesos y alternativas que son relevantes para alcanzar la meta definida (FMCN, 2009).

1.3.6. Proceso Analítico Jerarquizado (PAJ)

El Proceso Analítico Jerarquizado, fue desarrollado por el Dr. Saaty en los años 70. Está diseñado para reflejar la manera en que la gente piensa cuando se enfrenta a decisiones complejas y se basa en la descomposición, juicio comparativo y síntesis de las prioridades del problema de decisión (Malczewski, 1999). El PAJ parte del supuesto que en la toma de decisiones, la experiencia y el conocimiento de la gente es tan valiosa como los datos que se usan. El proceso consiste en descomponer una situación compleja y no estructurada en sus componentes, ordenarlos en una jerarquía, realizar comparaciones binarias y atribuir valores numéricos a juicios subjetivos, agregando las soluciones parciales en una solución (Barredo, 2005).

El método PAJ conduce a los tomadores de decisiones a analizar una decisión en partes, iniciando por definir el objetivo principal (jerarquía 1), los criterios (jerarquía 2), los subcriterios (jerarquía 3) y finalizando por las alternativas (jerarquía n). Una vez descompuesto o jerarquizado el problema (Figura 4), se utilizan técnicas de comparación pareada (par a par) dentro de cada jerarquía, con la finalidad de hacer juicios simples a través de la jerarquía, y de esta manera llegar a las prioridades globales de dichas alternativas ((Malczewski, 1999).

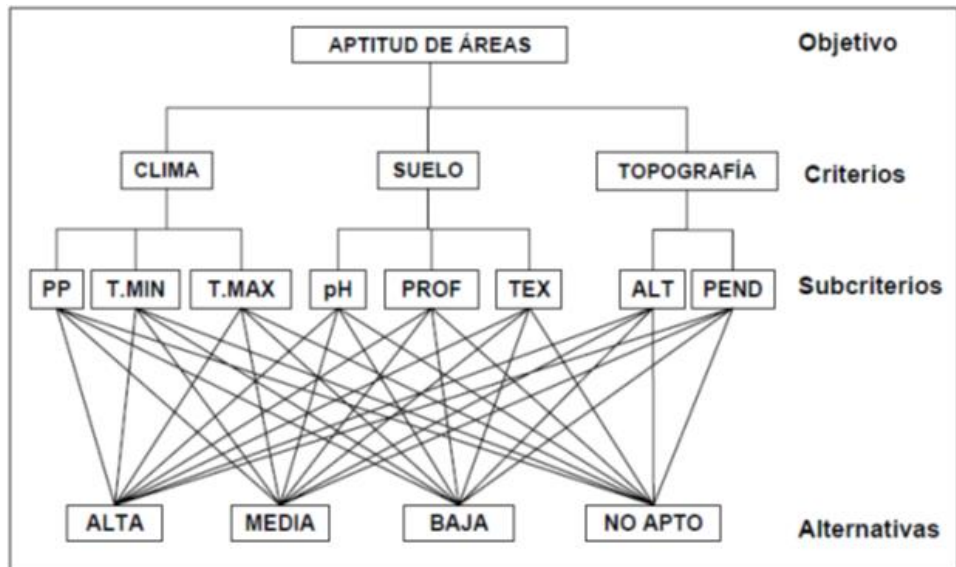


Figura 4. Descomposición de un problema en jerarquías (Fuente: Malczewski, 1999).

De acuerdo con Jiménez (2004), el PAJ tiene ventajas sobre otros métodos de decisión multicriterio, estas son:

- Sustento matemático
- Permite desglosar y analizar un problema por partes
- Permite medir criterios cuantitativos y cualitativos mediante una escala común
- Participación de diferentes personas o grupos de interés y genera un consenso
- Verifica el índice de consistencia y hace correcciones si es el caso
- Genera una síntesis y la posibilidad de realizar un análisis de sensibilidad
- Fácil uso y su solución se pueda complementar con métodos matemáticos de optimización

En un problema de decisión de tipo espacial, las alternativas son representadas en una base de datos SIG, donde cada capa o mapa contiene los valores de los atributos asignados a las alternativas y cada alternativa se relaciona con los atributos del nivel superior (Malczewski, 1999). Los mapas son referidos como mapas de atributos y representan la distribución espacial de un atributo. Estos se generan a partir de bases de datos que incluyen la distribución geográfica de los diferentes valores que adopta el atributo (SEMARNAT, 2006). Antes de iniciar cualquier método de EMC, se debe realizar la estandarización de los atributos.

1.3.6.1. Estandarización de criterios

Los mapas de atributos constituyen el insumo para el análisis de decisión multicriterio. Sin embargo, estos mapas no pueden ser comparados entre sí, dado que los atributos son medidos en diferentes unidades y diferente escala. Para que los mapas sean comparables entre sí, deben estandarizarse antes de que puedan ser usados (SEMARNAT, 2006).

La conversión de todos los mapas a escalas con un formato estándar aseguran cierto grado de legitimidad en la acumulación de las puntuaciones o niveles de los criterios para formar un valor único de aptitud (Malczewski, 1999). Al proceso de poner la importancia relativa de las clases de criterios se le llama estandarización, cuya escala de valores puede ser de 0 a 1 y se puede realizar mediante diferentes métodos.

1.3.6.2. Fases del Proceso Analítico Jerarquizado

De acuerdo con Saaty, las fases que comprenden este proceso son seis, las cuales según Barredo (2005) se describen de manera general:

1. Identificación de los criterios de decisión asociados al problema (paso común en todos los procedimientos de EMC).
2. Estructuración de los factores de una forma jerárquica, descendiendo desde los más generales a los más concretos y conectados nivel a nivel. Esta jerarquía suele estar formada por cuatro niveles: objetivos, criterios, subcriterios y alternativas (Figura 4).

La estructuración de una jerarquía depende de la visión que se tenga del sistema, de la cantidad de información relativa al problema con que se cuente y de las respuestas que se deseen obtener con su solución. Esto permite tener una visión global de las relaciones complejas existentes en el sistema y ayuda al tomador de decisiones a determinar si los aspectos obtenidos en cada nivel son del mismo orden

de magnitud, es decir, si son comparables. En la Figura 5, se muestra la jerarquización realizada como parte del planteamiento del problema para la identificación de áreas prioritarias para restauración ecológica, objetivo de este estudio.

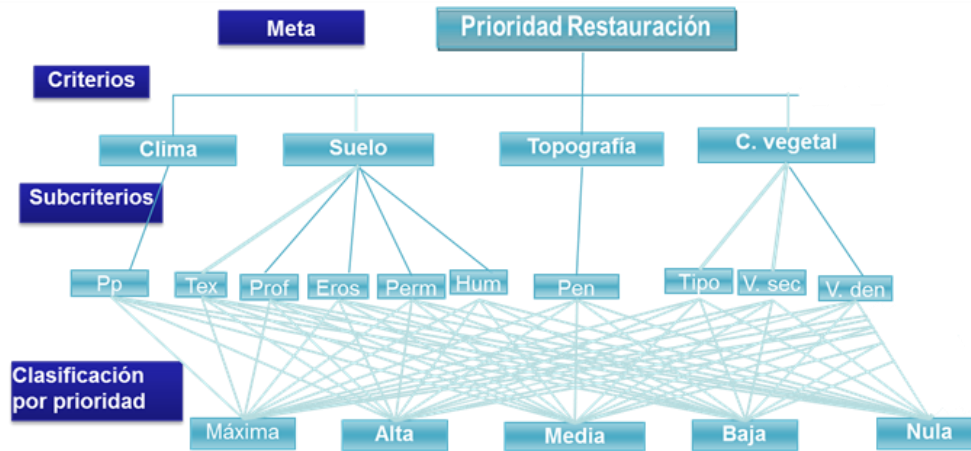


Figura 5. Organización jerárquica de los criterios considerados para obtener las áreas prioritarias a restaurar.

3. Establecer la importancia relativa de los elementos de cada jerarquía. Cada elemento de la jerarquía se convierten en valores cuantitativos usando la escala diseñada por Saaty (1980) y denominada escala fundamental (Cuadro 2). Esta escala es de numeración absoluta, usada para asignar valores numéricos a juicios realizados mediante la comparación de dos elementos.

Cuadro 2. Escala fundamental del Proceso de Análisis Jerárquico (PAJ).

Intensidad de importancia	Definición	Explicación
1	Igual importancia	Las dos actividades contribuyen de igual manera al objetivo
3	Importancia moderada	La experiencia y el juicio moderadamente a favor de una actividad sobre la otra
5	Importancia fuerte	La experiencia y el juicio fuertemente a favor de una actividad sobre la otra
7	Importancia muy fuerte o importancia demostrada	Una actividad es fuertemente favorecida sobre la otra
9	Extrema importancia	La evidencia favorece una actividad sobre la otra es del orden de afirmación más alto posible
2,4,6,8	Valores intermedios entre los valores de escala	Cuando es necesario un término medio
Recíproco distinto a cero	Si se asigna a_{ij} al comparar la actividad i con la j , entonces se asigna $a_{ij} = 1/a_{ji}$ al comparar la j con la i .	Supuesto razonable

El tomador de decisiones tiene que interpretar la información disponible para hacer juicios con base en sus conocimientos y experiencia en el proceso de comparación por pares. Este proceso se basa en preguntas de comparación, por ejemplo, dado un criterio y dos elementos; ¿Cuál de los dos elementos satisface más el criterio y cuánto más? La forma más efectiva de hacerlo es tomar un par de elementos y compararlos con respecto a una sola prioridad sin mezclar a las otras prioridades, utilizando la escala fundamental (Malczewski, 1999).

Se repite el procedimiento anterior para todos los elementos de un nivel con respecto a todos los elementos del nivel inmediatamente superior. El conjunto de todos esos juicios forma una matriz llamada “matriz de comparación por pares”, en el cual el conjunto de elementos se compara consigo mismo (Elineema, 2002). Después de construir la matriz de comparaciones pareadas se calcula lo que se denomina prioridad de cada uno de los elementos que se comparan.

1.3.6.3. Matriz de prioridades

Las prioridades de cada criterio (W) respecto a la meta global se presentan en el vector columna denominado vector de prioridades de los criterios (Figura 6).

$$\begin{array}{c} \text{Meta} \\ \text{Global} \\ \text{Criterio 1} \\ \text{Criterio 2} \\ \dots \\ \text{Criterio } m \end{array} \begin{bmatrix} P'_1 \\ P'_2 \\ \dots \\ P'_m \end{bmatrix}$$

Figura 6. Vector de prioridades de los criterios.

de este vector se desprende que m es el número de criterios y P'_i es la prioridad del criterio i con respecto a la meta global, para $i = 1, 2, \dots, m$.

La matriz de prioridades (Figura 7) es aquella que resume las prioridades para cada alternativa en términos de cada criterio. Para m criterios y n alternativas tenemos:

$$\begin{array}{c} \text{Criterio 1} \\ \text{Criterio 2} \\ \dots \\ \text{Criterio } m \end{array} \begin{array}{c} \text{Alternativa 1} \\ \text{Alternativa 2} \\ \dots \\ \text{Alternativa } n \end{array} \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1m} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{n1} & P_{n2} & \dots & P_{nm} \end{bmatrix}$$

Figura 7. Matriz de prioridades.

Donde P_{ij} es la prioridad de la alternativa i con respecto al criterio j , para $i = 1, 2, \dots, n$; y $j = 1, 2, \dots, m$.

La prioridad global para cada alternativa se obtiene del vector columna que resulta de multiplicar la matriz de prioridades con el vector de prioridades de los criterios (Figura 8).

$$\begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1m} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{n1} & P_{n2} & \dots & P_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P'_1 \\ P'_2 \\ \dots \\ P'_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{g1} \\ P_{g2} \\ \dots \\ P_{gi} \end{bmatrix}$$

Figura 8. Cálculo de la prioridad global.

Donde P_{gi} es la prioridad global (respecto a la meta global) de la alternativa i donde $i = 1, 2, \dots, n$. A este vector también se le conoce como Lambda (λ).

1.3.6.4. Estimación de la consistencia

Para asegurar que la toma de decisión sea lo más objetiva posible, las preferencias hechas por el grupo de tomadores de decisiones en el transcurso de las comparaciones pareadas, deben ser lo más consistentes posibles. La consistencia se interpreta como el grado de coherencia lógica entre las comparaciones pareadas y se define como la transitividad cardinal entre comparaciones (FMCN, 2009).

El PAJ ofrece un método para medir el grado de consistencia entre las prioridades dadas por el grupo de tomadores de decisiones. Si el grado de consistencia es aceptable, se continúa con el proceso de decisión. Si el grado de consistencia es inaceptable, quien toma las decisiones debe reconsiderar y modificar sus preferencias sobre las comparaciones pareadas antes de continuar con el análisis.

El índice de consistencia de la matriz de comparaciones por pares está dado por:

$$IC = \frac{\lambda - n}{n - 1} \quad \text{donde:}$$

IC = Índice de consistencia

λ = Promedio del vector de consistencia

n = número de criterios usados

Con este índice se calcula la proporción de consistencia, mediante la siguiente ecuación:

$$PC = \frac{IC}{IA} \quad \text{donde:}$$

PC = Proporción de consistencia

IA = Índice aleatorio de consistencia. Esto es el índice de consistencia de una matriz de comparaciones pareadas generada aleatoriamente, este se muestra en la Cuadro 3. Se puede ver que IA depende del número de elementos que son comparados.

Cuadro 3. Valores del índice aleatorio de consistencia.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
I.A.	0.00	0.00	0.52	0.89	1.11	1.25	1.35	1.40	1.45	1.49	1.51	1.54	1.56	1.57	1.58

Con la operación anterior se ha establecido la razón IC/IA, llamada proporción de consistencia (PC), que es considerada aceptable si es menor o igual a 0.10 (10%); es decir, se acepta la estimación de los pesos (W) cuando $PC \leq 10\%$. En caso contrario, se concluirá que W tiene demasiadas inconsistencias y se necesita una revisión (SEMARNAT, 2006).

4. Una vez teniendo los mapas de criterios estandarizados, éstos son multiplicados por los pesos de criterios (W) en cada nivel de la jerarquía para obtener los diferentes niveles de prioridad.

1.4. ÁREA DE ESTUDIO

1.4.1. Localización geográfica

Los municipios de Chignahuapan y Zacatlán, se localizan en el occidente de la Sierra Norte de Puebla (Figura 9), colindando al norte con los municipios de Huachinango y Chiconcuautla, al sur con el estado de Tlaxcala, al oeste con el municipio de Aquixtla y al poniente con el estado de Hidalgo (Centro Nacional de Desarrollo Municipal, 1999).

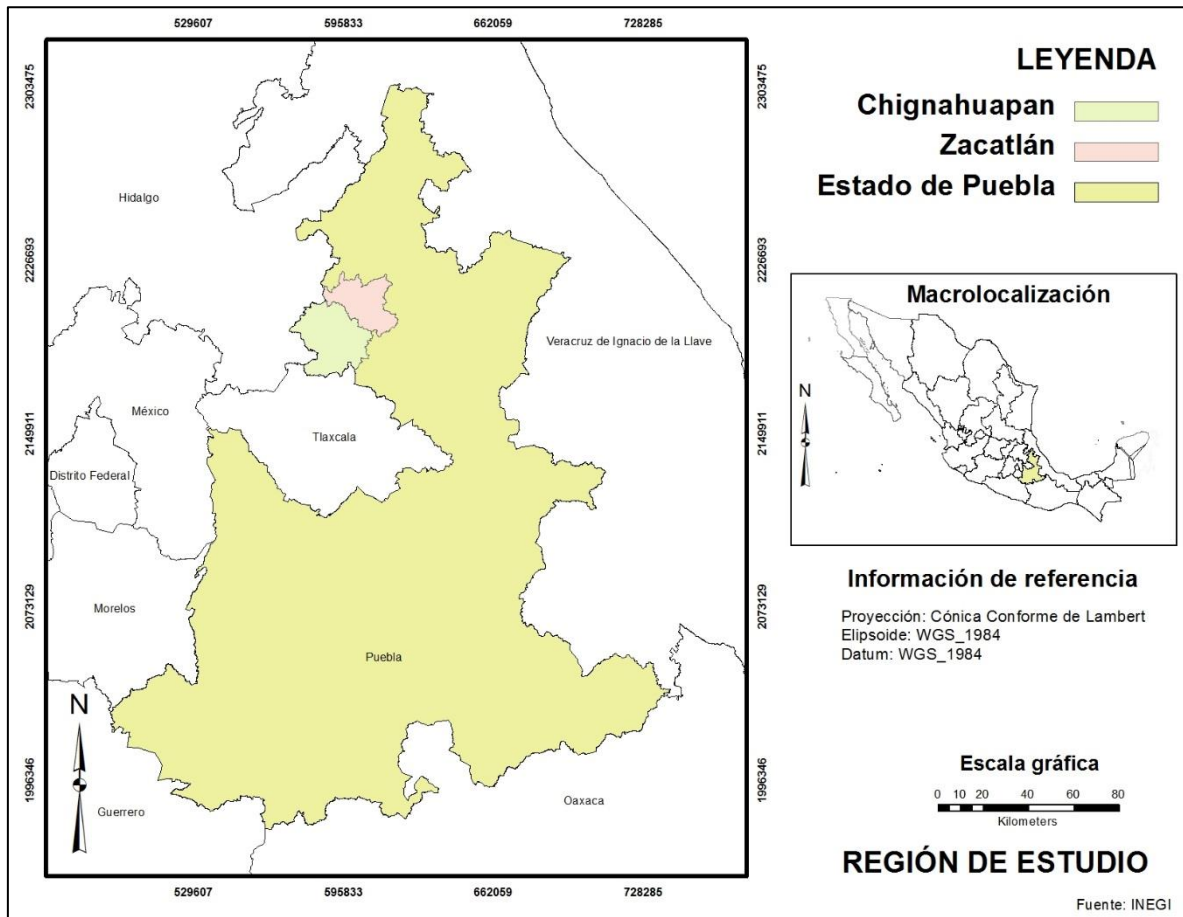


Figura 9. Ubicación del área de estudio (Chignahuapan-Zacatlán).

El área de estudio cuenta con una superficie de 124,956 hectáreas. La ubicación geográfica del municipio de Chignahuapan está entre los paralelos 19° 39" 42" y 19° 58" 48" LN y 97° 57" 18" y 98° 18" 06" LO, con una superficie total de 76,023 hectáreas, mientras que el municipio de Zacatlán se encuentra entre los 19° 50" 06" y 20° 08" 12" LN y 97° 51" 06" y 98° 12" 36" LO, con una superficie total de 48,933 hectáreas (Avalos y Baca, 2007).

1.4.2. Aspectos biofísicos y ambientales

Orografía y Fisiografía

El área de estudio forma parte de la continuidad del altiplano central con alturas promedio de 2,400 hasta los 2,800 msnm, en cadenas de cerros bien definidos en el sur y al oriente de la vertiente, ubicada en la provincia X del Eje Neovolcánico, (Avalos y Baca, 2007).

Las condiciones del área de estudio son dos en general; la primera denominada planicie, que va desde el altiplano central y constituye la mayor parte de la superficie del municipio de Chignahuapan, formando una extensa meseta con lomeríos de baja altura sobre el nivel de la planicie, y la segunda la vertiente occidental, que presenta superficies con mayores pendientes a medida que se integra en las rugosidades del eje montañoso de la Sierra Madre Oriental hasta desvanecerse en la planicie costera del Golfo, localizada en la zona norte y nororiental del municipio de Zacatlán (Avalos y Baca, 2007).

El sistema de toposformas presentes en Chignahuapan es el lomerío de tobas con llanuras en 42% del municipio, sierra volcánica de laderas escarpadas en el 30%, el lomerío de tobas ocupa el 16% y la llanura con lomerío de piso rocoso o cementado el 12% del municipio. En el municipio de Zacatlán la sierra volcánica de laderas escarpadas representa el 41% del territorio, la sierra alta escarpada el 31% y la sierra volcánica de laderas tendidas ocupa el 28% del municipio (PIGMEUM, 2009).

Clima

En el área de estudio se encuentran presentes seis tipos de clima predominantes, (Figura 10), de acuerdo con Avalos y Baca (2007) y PIGMEUM (2009) sus características son:

- 1. Templado subhúmedo con lluvias en verano de humedad media, C(w₁)(w).**
Es el clima predominante en el municipio de Chignahuapan, abarcando de un 85% a un 90 % del territorio. Característico por que la temperatura media anual varía entre los 12°C y 18°C, la precipitación total anual se encuentra entre los 600 mm y los 1,000 mm, y el porcentaje de lluvia invernal es menor del 5%.
- 2. Templado subhúmedo con lluvias en verano con mayor humedad, C(w₂).**
Este clima se localiza en una franja continua con dirección de noroeste a sureste desde la porción norte del municipio de Chignahuapan ocupando un 10% aproximadamente del territorio y del suroeste a sureste de Zacatlán abarcando un 24% del municipio. La temperatura media anual varía entre los 12°C y 18°C, con una precipitación total anual en un rango de los 700 mm a los 1,500 mm, y un porcentaje de lluvia invernal entre 5% y 10 %.
- 3. Semifrío subhúmedo de mayor humedad, C(E)(w₂)(w).** Este clima lo podemos localizar al sur de Chignahuapan en un rango altitudinal de los 2,880 a los 2,920 msnm, ocupando aproximadamente el 3.5% del municipio. La temperatura media anual varía de los 10°C a los 12°C, con una precipitación total anual en un rango de 700 mm a 1,000 mm y el porcentaje de lluvia invernal entre 5% y 10%.
- 4. Semifrío subhúmedo con lluvias en verano de humedad media, C(E)(w₂).** En el municipio de Chignahuapan este clima ocupa el 5% de la superficie, lo ubicamos al noroeste entre los 2,780 y los 2,916 msnm. Se caracteriza por tener una temperatura media anual entre 5°C y 12°C, la temperatura media del mes más frío (enero) varía de -3°C a 18°C, la precipitación total anual se encuentra en un rango de 300 mm a 600 mm, con menos del 5% de lluvia invernal.
- 5. Templado húmedo con abundantes lluvias en verano, C(m).** En el municipio de Zacatlán se ubica en gran parte del centro, 58% aproximadamente, en dirección noroeste-sureste. La temperatura media anual varía entre los 12°C y 18°C, con una precipitación total anual entre los 1,000 mm y más de 2,000 mm, con un porcentaje de lluvia invernal mayor al 5%.
- 6. Templado húmedo con lluvias todo el año, C(fm).** Localizado en una franja que va del norte al noreste del municipio de Zacatlán, ocupando el 16% del territorio aproximadamente. Se caracteriza por una temperatura media anual

entre los 12°C y los 18°C, con una precipitación total anual en un rango de los 1,200 mm a 3,000 mm, teniendo en el mes más seco un promedio de 40 mm de lluvia y con menos del 18% de precipitación invernal. Otra característica de este tipo de clima, es la presencia de neblina en las laderas de las sierras, la nubosidad y las condiciones de mayor humedad.

7. **Semicálido húmedo con lluvias todo el año (A)C(fm):** La temperatura media anual fluctúa entre los 18° y 24°C y la precipitación total anual entre los 1,200 y 4,500 mm, se localiza a alturas promedio de 430 a 1700 msnm.

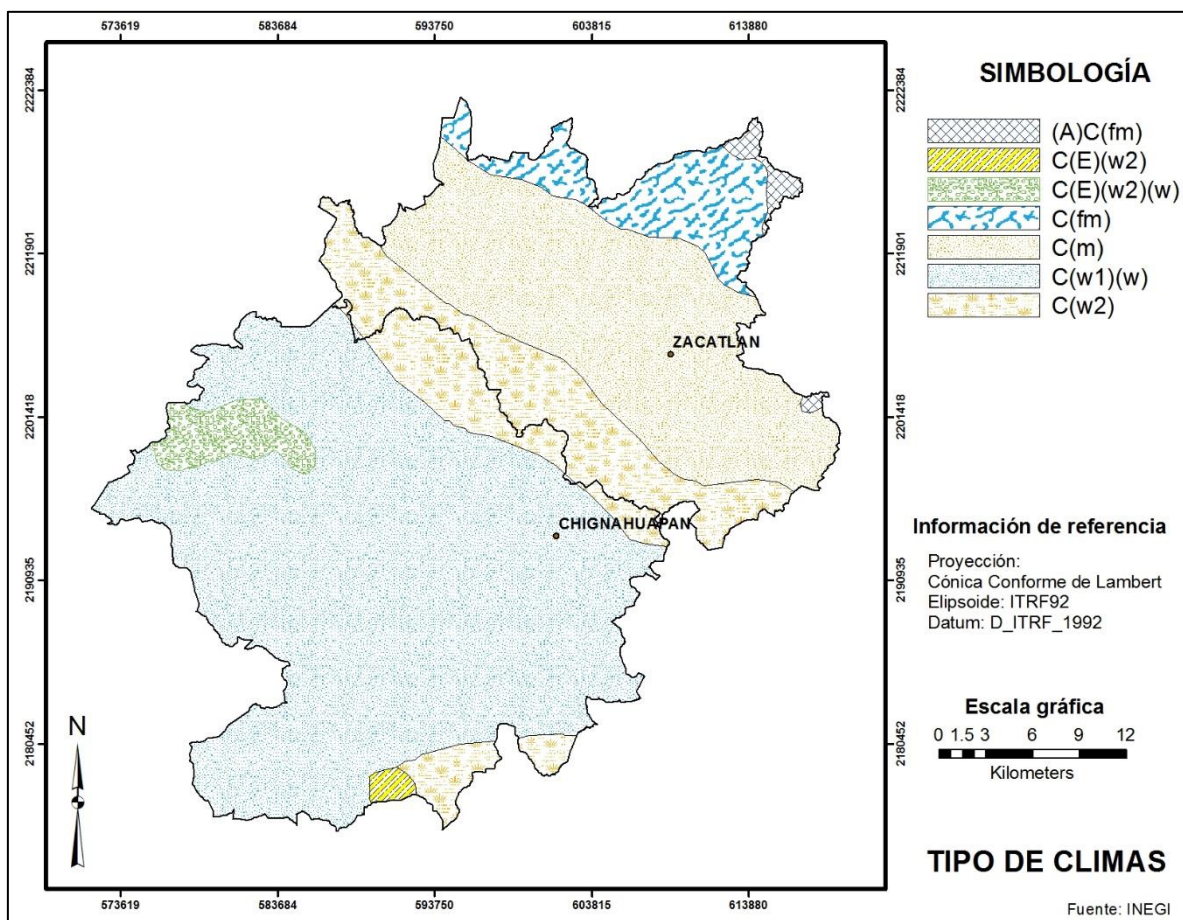


Figura 10. Distribución de los tipos de clima dentro de la región Chignahuapan-Zacatlán.

Hidrología

El municipio de Zacatlán se encuentra dentro de la región Hidrológica Tuxpan–Nautla “RH27”, mientras que el 76% del municipio de Chignahuapan se encuentra dentro de esta área pero, el otro 22% de la superficie pertenece a la región Pánuco y el 2% restante a la región del Balsas. La cuenca predominante en el área es la de río Tecolutla, ocupando el 100% de Zacatlán y el 76% de Chignahuapan, el resto de la entidad se encuentra dentro de la cuenca del R. Moctezuma y R. Atoyac, ocupando el 22% y 2% respectivamente (Figura 11).

La corriente de agua perenne que comparten los dos municipios es el río Agrío. En Chignahuapan se encuentran las corrientes Ahualtongo, Blanco, Cantarranas, Hondo, San Pedro, Totolapa y Xalatlaco. Dentro del municipio de Zacatlán están presentes las afluentes Ajalpan, Atenco, Hueyatlagco, San Lorenzo, Texanapa, Tlachimalco, Tlaxco y Toloapa. Sólo en el municipio de Chignahuapan se encuentran presentes corrientes intermitentes, estas son: Agua Escondida, Capulaque, Hondo, La Mora y San Lorenzo (PIGMEUM, 2009).

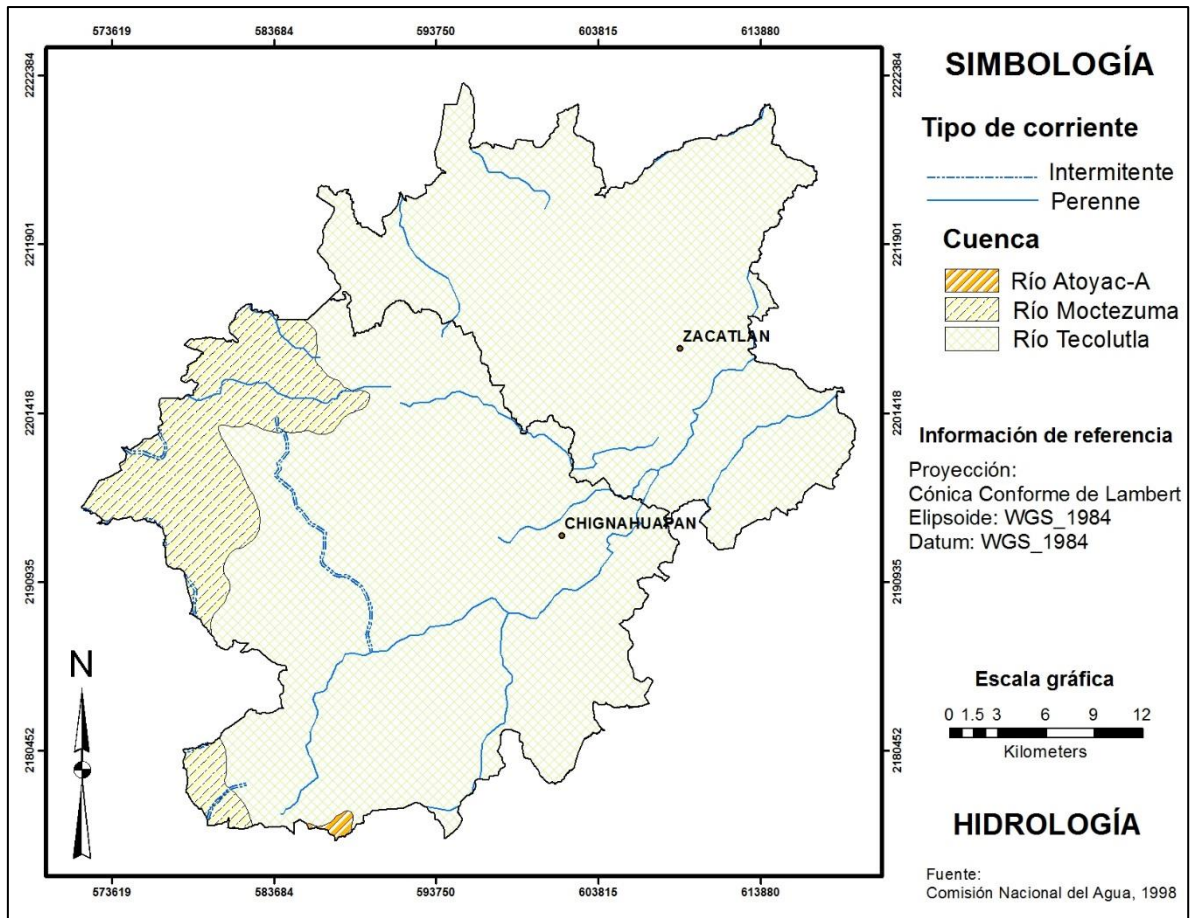


Figura 11. Cuencas y corrientes dentro del área de estudio (Chignahuapan-Zacatlán).

Suelos

En la Figura 12 se presentan los tipos de suelo y distribución dentro del área de estudio, basado en la clasificación utilizada por CONABIO en la carta Edafológica. De acuerdo con IUSS (2007), se describen los tipos de suelo más predominantes en la zona.

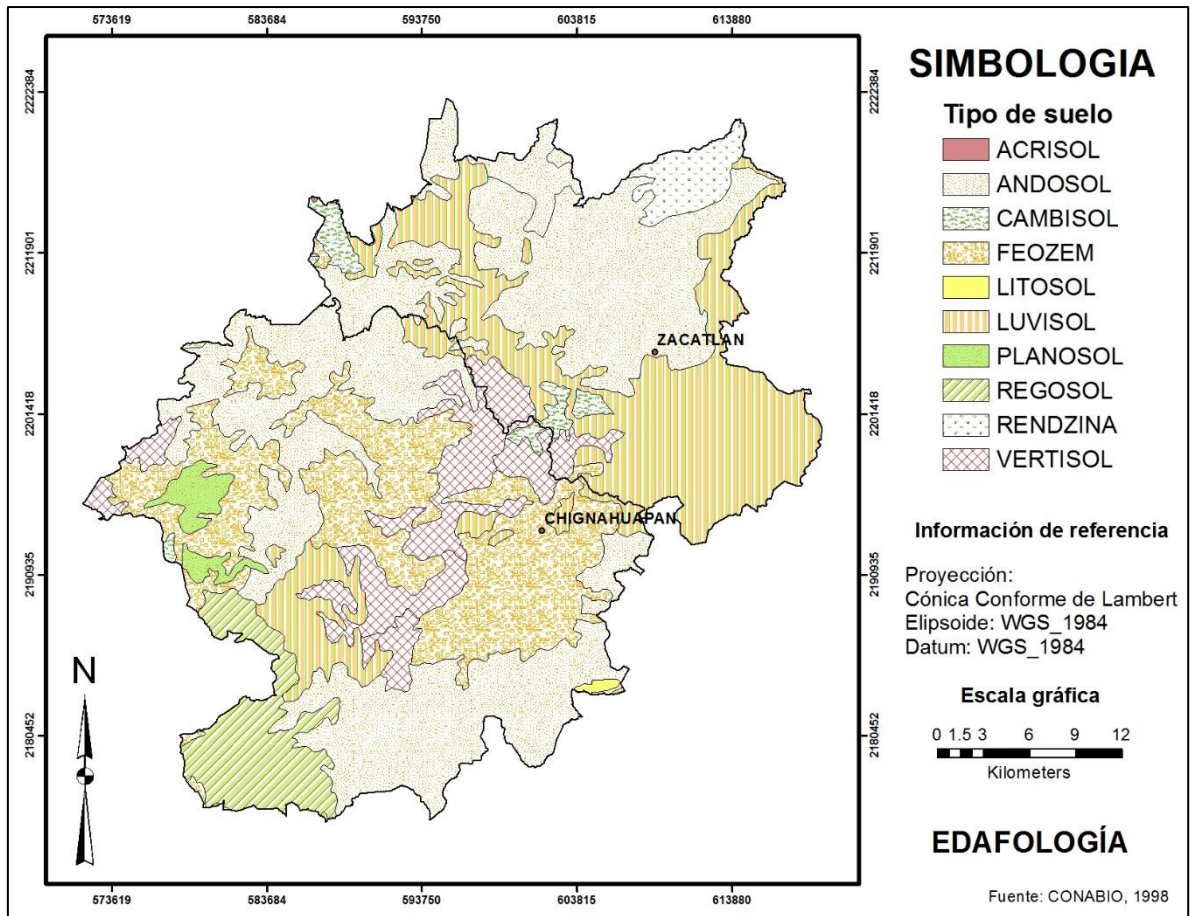


Figura 12. Distribución de los tipos de suelo en los municipios de Chignahuapan y Zacatlán.

Andosol: Suelos derivados de cenizas volcánicas, poco desarrollados, muy ligeros y con alta capacidad de almacenamiento de agua, poco fértiles y muy susceptibles a la erosión. En Chignahuapan este tipo de suelo ocupa el 35% del territorio y en el municipio de Zacatlán el 40%.

Feozem: Suelos oscuros, porosos, ricos en materia orgánica y nutrientes. Susceptibles a la erosión eólica e hídrica. Se presenta en tres fases, calcárico, háplico y lúvico. En el área de estudio se encuentra presente en el 39% del municipio de Chignahuapan y en 17% del territorio correspondiente a Zacatlán.

Luvisol: Suelos con mayor contenido de arcilla en el subsuelo que en el suelo superficial, son suelos fértiles. Cuando se encuentran en pendientes fuertes

requieren medidas de control de la erosión. En el municipio de Zacatlán ocupa el 26% de su superficie y en Chignahuapan se encuentra en solo el 6%.

Regosol: Débilmente desarrollados en material no consolidado, extendidos en tierras erosionadas, parecidos a la roca madre, en general bajos en nutrientes. Se presenta en tres fases calcárico, dístrico y éutrico.

Vertisol: Suelos muy arcillosos frecuentemente negros o grises, forman grietas anchas y profundas en la época de sequía, susceptibilidad al anegamiento, pegajosos cuando están húmedos y muy duros cuando están secos. Podemos encontrar este tipo de suelo en 13% y 14% de los municipios de Chignahuapan y Zacatlán respectivamente.

Vegetación y uso del suelo

Para determinar el tipo de vegetación y uso del suelo predominantes en el área de estudio, se tomó como base la información proporcionada por el INEGI en su carta de vegetación y uso del suelo serie III, se muestra en la Figura 13. Los cuáles se describen a continuación (INEGI, 1997):

Cuerpo de agua: Masa o extensión de agua, que cubre parte de la Tierra. En el área de estudio existen aproximadamente 206 hectáreas lo que representa el 0.16% de la superficie total.

Zona urbana: Referido al espacio físico construido con diversas edificaciones e infraestructura de servicios, donde habitan poblaciones mayores de 2,500 personas. En el área de estudio la superficie que ocupa es de 3,523 hectáreas, representando el 2.8% del área total.

Agricultura: Actividad humana en la que se producen del suelo diferentes tipos de cultivos, puede ser de temporal o de riego. En el zona de estudio la agricultura de

temporal ocupa 65,405 hectáreas, equivalentes al 52.3%, es la categoría que ocupa mayor superficie. Adicionalmente, se tienen 3,684 hectáreas de agricultura de temporal combinadas con pastizal inducido, lo que representa el 2.9% del territorio.

Bosque: Se define bosque como una masa de vegetación arbórea, principalmente de zonas templadas y semifrías, en climas subhúmedos a muy húmedos (CONABIO, 2011). Existen distintos tipos de bosques dependiendo de las especies presentes en ellos. En la zona de estudio se encuentran presentes los siguientes tipos de bosque:

- **Bosque de pino:** Ocupa el 40.5% del área de estudio, aproximadamente 49,900 hectáreas, las principales especies que se encuentran son *Pinus patula*, *P. moctezumae*, *P. ayacahuite* var. *veitchii*, *P. leiophylla*, *P. pseudostrobus*, *P. rudis*, y *P. teocote*, dentro del estrato arbustivo se presentan especies como *Arbutus xalapensis* y *Baccharis conferta*. Se localizan en altitudes superiores a los 2,500 msnm. (Avalos y Baca, 2007).
- **Bosque de pino-encino:** Se encuentra en el 2.3% de la superficie total, equivalentes a 2,987 hectáreas. Constituido principalmente por especies de los géneros *Pinus* y *Quercus*, son bosques por lo general bajos, con troncos delgados y de crecimiento lento (CONABIO, 2011); las especies de encino que se pueden encontrar son *Quercus crassifolia*, *Q. scytophylla* y *Q. conglomerata*; también están presentes especies como *Alnus jorullensis*, *Arbutus xalapensis*, *Baccharis conferta* y *Pteridium* sp. (Avalos y Baca, 2007).
- **Bosque mesófilo de montaña:** Se encuentra en tan sólo 191 hectáreas de la zona, representando el 0.15%. Localizado en lugares con relieve accidentado, en laderas escarpadas y cañadas protegidas contra el viento y la insolación, con mayor gradiente de humedad que en el resto de los tipos de bosques, se establece entre los 1,000 y los 2,500 msnm. Algunos de los géneros característicos son *Liquidambar*, *Quercus*, *Clethra*, *Meliosma* y una gran gama de epífitas, especialmente orquídeas y bromeliáceas (CONABIO, 2011).
- **Pastizal inducido:** Comunidad vegetal dominada por gramíneas (pastos o zacates), originado por influencia humana, se desarrolla al eliminarse la vegetación original (bosque, selva, matorral, etc.) o en áreas agrícolas

abandonadas (INEGI, 1997). Es tipo de vegetación la encontramos en 1,644 hectáreas de la zona, aproximadamente el 1.3% de la superficie total de estudio.

Es importante mencionar, que en el municipio de Chignahuapan también se encuentra presente el bosque de Oyamel, dado la escasa superficie que ocupa, no es visible en el mapa. Se localiza en las partes más altas del municipio entre los 2,500 y 3,200 msnm, la especie dominante es *Abies religiosa*, comúnmente se encuentra mezclado con especies del género *Pinus* y algunas veces con *Quercus*.

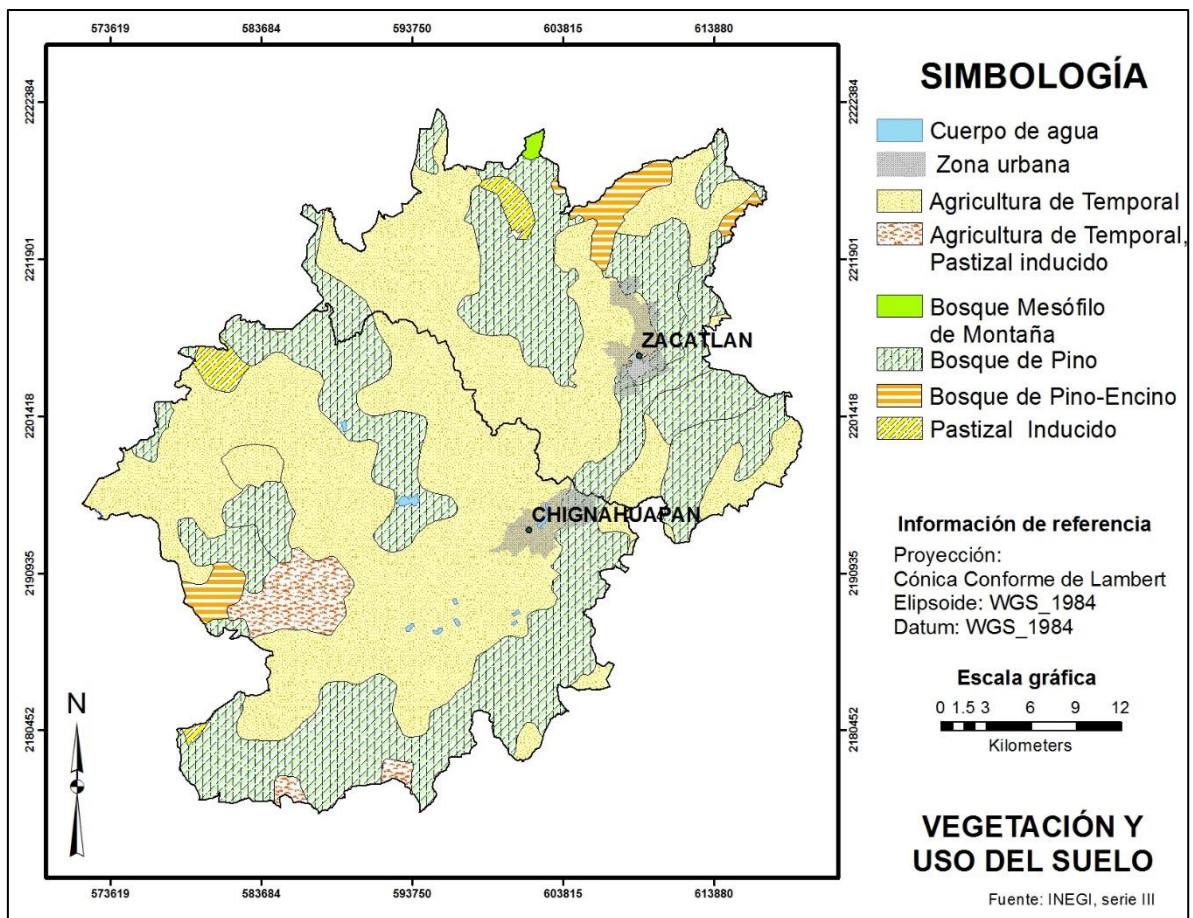


Figura 13: Vegetación y uso del suelo presentes en la región Chignahuapan-Zacatlán.

1.4.3. Aspectos socioeconómicos

Examinar la dinámica de la población y los factores sociales, políticos y económicos, su distribución y su acción sobre el territorio, es necesario para comprender el impacto de las actividades humanas sobre los sistemas naturales (CONABIO, 2011).

Población

A la población se le ha ubicado como un factor de presión a la biodiversidad, la principal presión ambiental que representa obedece a la forma de urbanización y a su sistema de transporte individualizado. En el Cuadro 4, se presenta el escenario del área de estudio, de acuerdo con los datos proporcionados por el Censo de Población y Vivienda 2010 y el Consejo Nacional de Población (CONAPO) 2011.

Cuadro 4. Cifras demográficas del área de estudio.

	CHIGNAHUAPAN	ZACATLÁN	TOTAL
Población total	57,909	76,296	134,205
Población total hombres	28,228	36,133	64,361
Población total mujeres	29,681	40,163	69,844
Densidad de población¹	76	156	---
Tasa de crecimiento poblacional anual²	2.4	1.8	---
Índice de marginación³	26.259	24.949	---
Población urbana²	22,443	40,223	62,666
Población rural²	35,466	36,073	71,539

1. Habitante/km². Gobierno del estado de Puebla.
2. Gobierno del estado de Puebla.
3. CONAPO 2011.

El índice de marginación es concebido con el interés particular de ser una medida que dé cuenta de las carencias que padece la población (CONAPO, 2011).

Tenencia de la tierra

La tenencia de la tierra se define como las formas de propiedad reconocidas por la ley, en las que una persona o grupo de personas posee la tierra o dispone de ella (INEGI, 2012). En el caso del área de estudio el tipo de tenencia ejidal corresponde a un 78.4% y 21.8% de la superficie de los municipios de Chignahuapan y Zacatlán respectivamente, seguido de la propiedad particular con el 17.9% y 72.8%; los asentamientos humanos y espacio públicos son los que ocupan menor superficie con un 3.6% del municipio de Chignahuapan y el 5.3% correspondiente a Zacatlán (Avalos y Baca, 2007).

Actividades Productivas

Las principales actividades económicas en la zona de estudio son la agricultura y la silvicultura. En el Cuadro 5 y la Figura 14 se muestra el porcentaje de ocupación de cada actividad dentro del área de estudio (Avalos y Baca, 2007).

Cuadro 5. Actividades productivas en los municipios de Chignahuapan y Zacatlán.

	Superficie ha ¹	Agrícola %	Ganadero %	Agropecuario %	Forestal %	Otros %
Chignahuapan	46,432.72	54.6	7.2	3.4	31.5	3.1
Zacatlán	11,184.24	67.3	0.19	---	30.6	1.7

1. Superficie correspondiente a áreas de uso común y superficies parceladas. SEMARNAT, 2007.

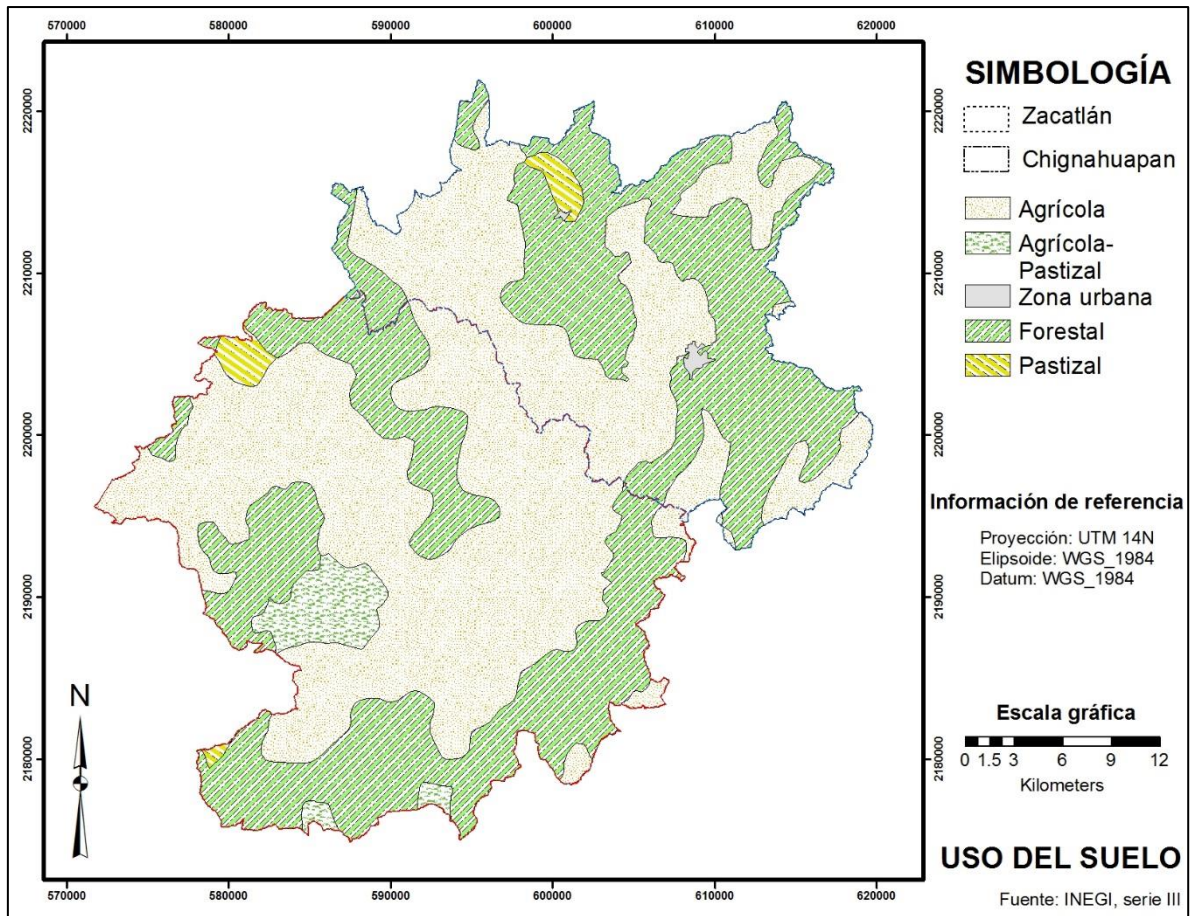


Figura 14. Uso del suelo en los municipios de Chignahuapan y Zacatlán.

1.4.4. Problemática ambiental del área de estudio

El deterioro de los ecosistemas en el estado de Puebla es de larga historia y se hace visible recientemente, en especial a partir de la urbanización que acompaña a la industrialización. Esta situación se hace contundente a partir de 1960, década en la que el impacto de la actividad humana sobre el medio natural se comienza a tornar grave para el bienestar de los poblanos y para el funcionamiento de sus ecosistemas (CONABIO, 2011).

Sin embargo, la problemática ambiental del estado está relacionada con el reparto de tierras sobre todo las forestales. Las políticas de tenencia de la tierra en México han tenido un impacto negativo sobre las áreas forestales. La Reforma Agraria de 1934 promovió a ocupación de las áreas forestales, lo que provocó que se convirtieran

terrenos forestales a agrícolas o ganaderos; lo que originó altas tasas de deforestación y el avance de la frontera agrícola. Así mismo, en la reforma constitucional de 1947, la demarcación de áreas forestales no se definió y se usaron como de uso común, propiciando el deterioro y la conversión a otros usos del suelo (INIFAP, 2005).

El problema de degradación de los recursos forestales del estado de Puebla se incrementó de 1937 a 1975, cuando se vieron envueltos en una corriente conservacionista y estableciéndose la veda forestal estatal, la única posibilidad de aprovechamiento era la concesión otorgada a la Fábrica de Papel San Rafael en 1948. Lo anterior, ocasionó mayor destrucción del recurso por la alta presencia de incendios forestales, cambio de uso del suelo, tala clandestina, plagas y enfermedades forestales, pastoreo desordenado e inadecuada administración de los recursos (Avalos y Baca, 2007).

Una vez concluida la veda forestal en 1975, se inició el Plan Forestal Puebla (PFP), con los objetivos de proteger y cultivar el bosque, obtención del mayor valor por las materias primas y productos, mejoramiento del nivel de vida de los campesinos forestales y la protección al medio ambiente. Con este proyecto se inició la constitución de las organizaciones de productores forestales. En el año de 1992 con el decreto de la Ley Forestal se suprime el esquema de las organizaciones de productores forestales y se desregula el transporte y transformación de materias primas, propiciando la proliferación de pequeños talleres y aserraderos. Situación que generó un déficit de la materia prima respecto a la demanda, cubriéndose la demanda con madera ilegal del propio estado, provocando efectos negativos a los recursos naturales (INIFAP, 2005).

La incidencia del claudestinaje se incrementó en el año 2001, a raíz de la crisis económica. Frente a la carencia y a la necesidad de recursos económicos, el bosque representa, para los empobrecidos campesinos, una de las escasas fuentes de recursos de las que pueden echar mano. A partir de esto, la Unión de Ejidos de

Chignahuapan ha impulsado la creación de una instancia intersectorial regional (Comité Mixto Regional Forestal Ambiental de la Sierra Norte, Ocotli) como estrategia para detener el deterioro de los bosques, favorecer su manejo sustentable y la restauración forestal (Barton y Merino, 2005). En la actualidad, la problemática a cerca de la demanda de materias primas forestales, sigue vigente, superando en estos momentos en más de un 50% a la producción estatal, por lo que se prevén graves problemas de aprovechamiento clandestino en los bosques del estado (Avalos y Baca, 2007).

Otro agente de perturbación, son los incendios forestales los cuales representan uno de los principales problemas de degradación, del año 2000 al 2012, la superficie afectada fue de 59,856 hectáreas; en la Figura 15 se muestra la superficie afectada por año. Los incendios frecuentemente son propiciados por quemas para convertir bosques en terrenos de pastoreo o de cultivos, teniendo como consecuencia áreas con rendimientos bajos y acelerando la erosión del suelo (CONABIO, 2011).

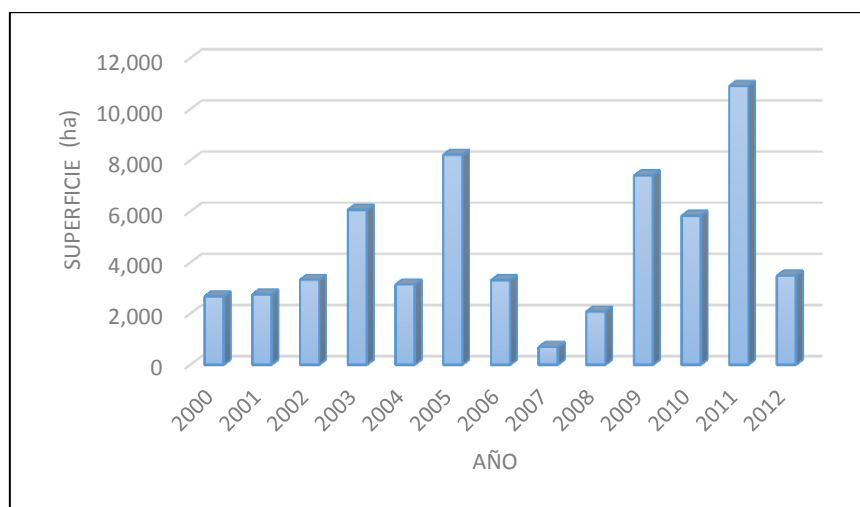


Figura 15. Superficie afectada por incendios forestales en el estado de Puebla (Fuente: SNIF, 2013).

El Comité Ocotli indica que la problemática forestal de la región obedece a la crisis económica y sus impactos en la calidad de vida de los productores y las condiciones de los mercados forestales regional y nacional. Las políticas públicas y la acción institucional también contribuyen con la problemática, por ejemplo, la lentitud con que

SEMARNAT efectúa los trámites para la obtención de permisos de extracción y la ineficiencia de las instancias de vigilancia de los delitos forestales (PROFEPA) hacen que los mecanismos de denuncia y sanción resulten inoperantes (Barton y Merino, 2005).

En los municipios de Chignahuapan y Zacatlán se han estimado 7,779 hectáreas y 15,072 hectáreas respectivamente, con problemas de degradación (Avalos y Baca, 2007). En un esfuerzo por combatir el proceso de degradación, en once años (1993-2003) el estado de Puebla reportó una superficie reforestada de 75,706 ha, sin embargo de acuerdo con el Inventario Nacional Forestal del año 2000, la tasa de deforestación anual para la entidad se ha estimado en 10,012 ha, lo que indica que la superficie reforestada no es suficiente para contrarrestar y revertir el proceso (INIFAP, 2005).

Por este motivo, es de suma importancia identificar las áreas en donde se hace prioritaria la intervención de la sociedad para realizar actividades de restauración ecológica con la finalidad de revertir el proceso de degradación presente en la zona desde el siglo pasado.

Capítulo II. IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS PRIORITARIAS MEDIANTE EL USO DE SIG Y EVALUACIÓN MULTICRITERIO

2.1. INTRODUCCIÓN

Una pregunta crítica sobre la restauración y conservación de la naturaleza es ¿Dónde actuar primero?; dado que los recursos financieros son limitados. Por tanto, la restauración debería centrarse en áreas donde se produzcan los mayores beneficios. El establecimiento de prioridades ha recibido poca atención en el contexto específico de la restauración ecológica (Geneletti *et al.*, 2011). Las estrategias para priorizar los esfuerzos de restauración a menudo están faltantes. Muchos trabajos de restauración se ubican en determinados sitios debido a la escasez de recursos económicos, de tal manera es importante llevar a cabo la identificación de aquellos sitios en los que la restauración podría proveer mayores beneficios y/o donde se hace más necesaria. Esta identificación puede ser vista como un problema de planificación en el cual interactúan aspectos sociales, económicos y ecológicos (Echeverría *et al.*, 2010).

La elección de los sitios destinados a restauración ecológica, es una decisión que debería hacerse en conjunto con los criterios y preferencias de los propietarios y la opinión de expertos. Esta debe justificarse en una priorización técnica, basada en las necesidades de la comunidad y en criterios de estrategias globales de conservación o de las políticas de gestión de autoridades públicas y organizaciones ejecutoras (MAVDT, 2003; Geneletti *et al.*, 2011). Actualmente se cuentan con herramientas cada vez más importantes que nos permiten pensar y planear estratégicamente, pero estas herramientas son raramente empleadas. Por lo tanto, tenemos que pensar en grande sobre cuestiones espaciales, temporales y estratégicas (SER, 2009).

Según la Estrategia Global de Conservación, la priorización se sustenta en la aplicación de tres criterios: 1. **Significancia:** tiene en cuenta la contribución a la solución de otros problemas, área y personas beneficiadas e importancia para los

más afectados, 2. **Urgencia:** velocidad de avance del problema si no se trata a tiempo o velocidad a la que avanza la solución si se implementa, 3. **Reversibilidad:** en qué medida son reversibles los efectos del problema. Según el Protocolo Nacional de Restauración de Colombia debe agregarse un cuarto criterio alusivo a la factibilidad técnica de la restauración en cada una de las posibles áreas a intervenir (MAVDT, 2003).

La selección de prioridades de restauración, es un problema complejo de planificación del uso de la tierra que incluye la recopilación y el procesamiento de la información relacionada con aspectos ambientales, socioeconómicos y operativos. La naturaleza espacial del problema hace necesario el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para manejar de manera sencilla, los datos georeferenciados (Geneletti *et al.*, 2011). De hecho, los SIG integrados con técnicas de EMC pueden asistir, o bien constituirse en una importante herramienta para procesos de planificación y priorización. Esta combinación de técnicas es uno de los métodos utilizados para la determinación de áreas prioritarias, siendo una herramienta de apoyo para la descripción, evaluación, ordenación, jerarquización y selección de alternativas o cursos de acción (Barredo, 2005, Olivas *et al.*, 2007).

En este trabajo se empleó el método denominado Procedimiento Analítico Jerarquizado (PAJ), el cuál es un método de la Evaluación Multicriterio, en combinación con un Sistema de Información Geográfica, para identificar los sitios que necesitan restauración ecológica, clasificados por orden de prioridad de atención.

2.2. OBJETIVOS

- Identificar las áreas con necesidad de ser restaurados ecológicamente en los municipios de Chignahuapan y Zacatlán, utilizando un SIG y la técnica de evaluación multicriterio denominada Proceso Analítico Jerarquizado

- Generar el mapa de ubicación de las zonas que necesitan restauración ecológica, clasificadas por orden de prioridad

2.3. MATERIALES Y MÉTODOS

2.3.1. Criterios y subcriterios para la identificación de las áreas prioritarias

Los criterios son uno de los aspectos fundamentales de la EMC, un criterio se define como “cierta base para la toma de una decisión, está puede ser medida y evaluada. Es la evidencia sobre la cual se basa una decisión” (Eastman *et al.*, 1993).

Los criterios empleados para realizar la identificación de áreas potenciales para realizar restauración ecológica, así como su prioridad de atención se seleccionaron mediante revisión de literatura, enfocándose principalmente en los factores que causan algún tipo de degradación en los ecosistemas y que a su vez se encontrarán disponibles de manera cartográfica para la región de estudio. Seleccionados los criterios, se aplicaron encuestas a expertos y/o especialistas en el tema de restauración ecológica para identificar y precisar los criterios más importantes (Cuadro 6).

Cuadro 6. Criterios y subcriterios utilizados para la identificación de las áreas prioritarias para restauración ecológica.

CRITERIO	SUBCRITERIO
CLIMA	Precipitación
SUELO	Textura Profundidad Nivel de erosión Permeabilidad Humedad del suelo
TOPOGRAFÍA	Pendiente
COBERTURA VEGETAL	Uso del suelo Presencia de vegetación secundaria Presencia de vegetación densa

Una vez definidos los subcriterios, se constituyó la base de datos con la cartografía digital disponible como cartas temáticas, modelos de elevación digital e imágenes de satélite. Toda la información se homogeneizó a la Proyección Universal de Mercator (UTM) zona 14 y Datum WGS84 (1984).

2.3.2. Diseño de base de datos cartográfica

Una base de datos es una colección de tablas en formato digital interrelacionadas. En un SIG existen dos tipos de bases, la base de datos espacial y la de atributos. Estos registros son la parte central del sistema y consiste básicamente en una colección digital de capas (mapas) e información asociada (Guzmán, 2000).

Para cumplir con los objetivos planteados, se diseñó la base de datos para los municipios de Chignahuapan y Zacatlán, utilizando como fuentes de información la cartografía publicada por el INEGI y CONABIO escala 1: 250,000. La información se homogenizó en cuanto a proyección y datum, para hacer posible el modelado cartográfico. A continuación se muestran los mapas que conforman la base de datos empleada en el estudio.

Precipitación

En este criterio se debe considerar la cantidad y distribución de la precipitación a lo largo del año, menores valores y estacionalidad más marcada se asocian con el déficit hídrico y por consiguiente, con limitantes para la restauración. La precipitación es la variable más importante considerando el factor tiempo, puesto que además de influir en el déficit hídrico, su ausencia en áreas altas conlleva a la intensificación de las heladas (MAVDT, 2003).

Este mapa se obtuvo de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). En el área de estudio, el rango de precipitación es bastante amplio, va desde los 600 mm a los 4,000 mm de precipitación media anual (Figura 16).

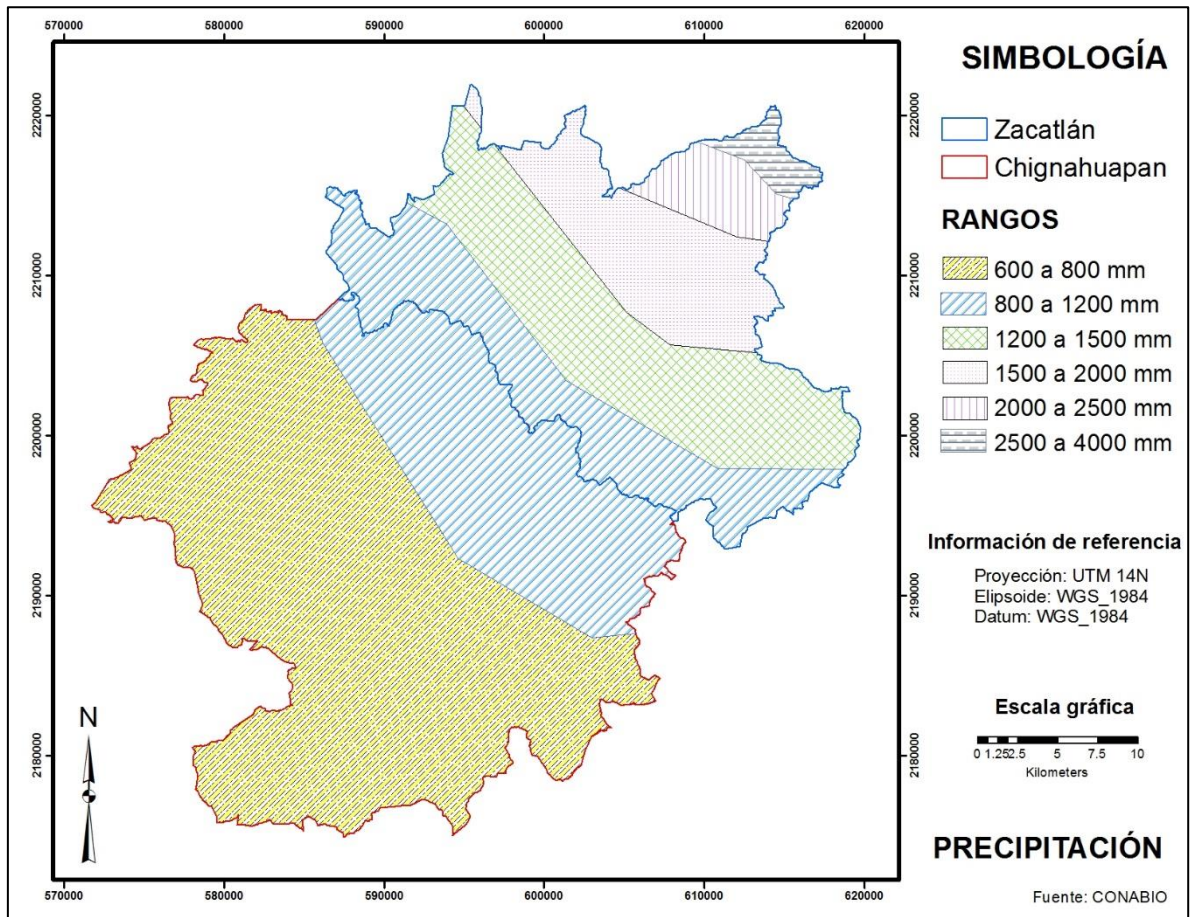


Figura 16. Distribución de la precipitación media anual en el área de estudio (Chignahuapan-Zacatlán).

Humedad del suelo

Este criterio fue incluido dado que, existe un alto riesgo de degradación de los suelos durante e inmediatamente después de una sequía (Herrick y Bestelmeyer, 2011), por ello entre más tiempo permanezca con humedad un suelo, presenta un menor riesgo de erosionarse. El mapa se obtuvo de INEGI, el cual indica el número de meses que el suelo permanece con humedad (Figura 17). En el área de estudio el rango varía entre los 2 y 12 meses.

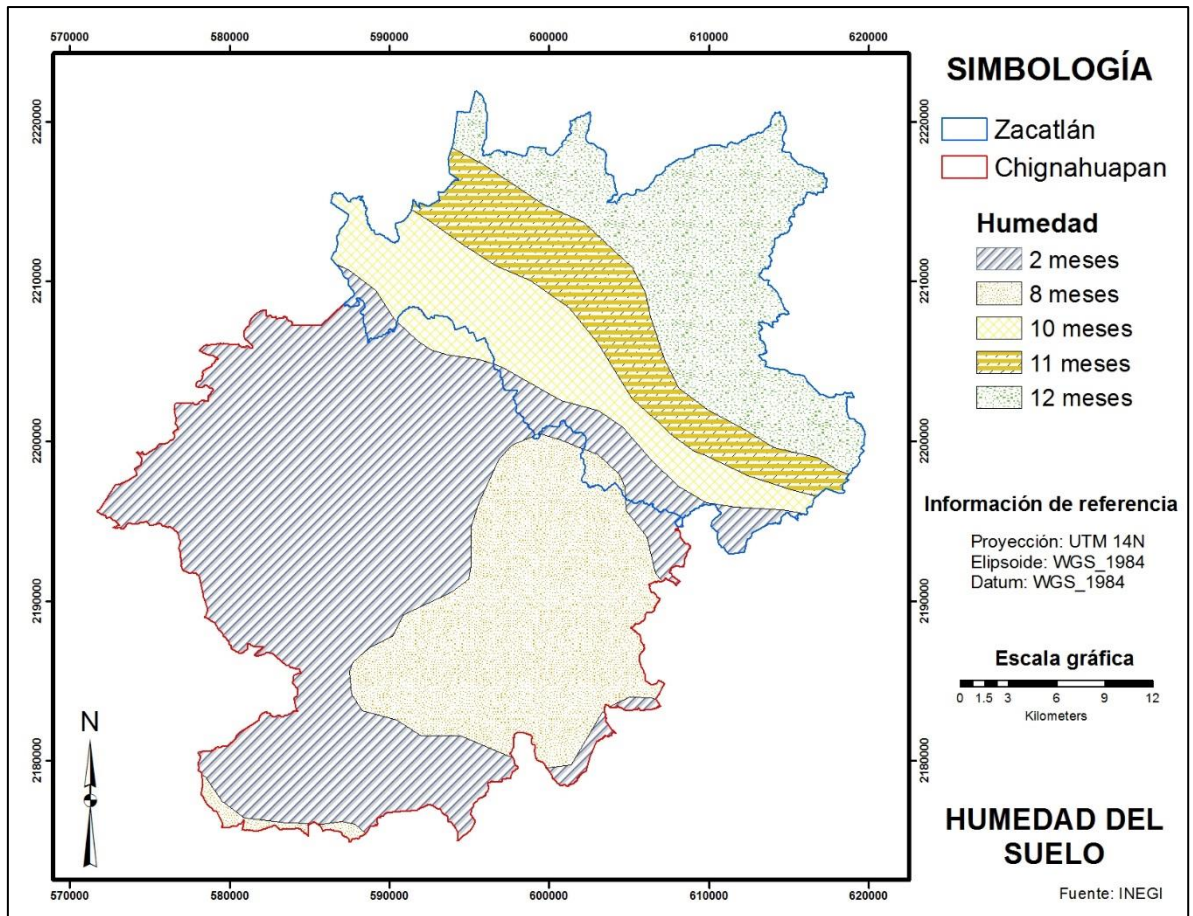


Figura 17. Zonificación de la región Chignahuapan-Zacatlán, de acuerdo al tiempo que permanece húmedo el suelo.

Textura del suelo

La textura tiene influencia sobre el movimiento y la disponibilidad de humedad en el suelo, aireación, disponibilidad de nutrientes y resistencia a la penetración por las raíces. También influye sobre las propiedades físicas, como la agregación que se relaciona con la susceptibilidad del suelo a la degradación (INEGI, 1998; MAVDT, 2003).

Este mapa se obtuvo del mapa digital de Edafología proporcionado por CONABIO (Figura 18). La mayor parte de la superficie en la zona de estudio presenta una textura media, aproximadamente 78,634 hectáreas y la superficie con textura fina es de 46,021 hectáreas.

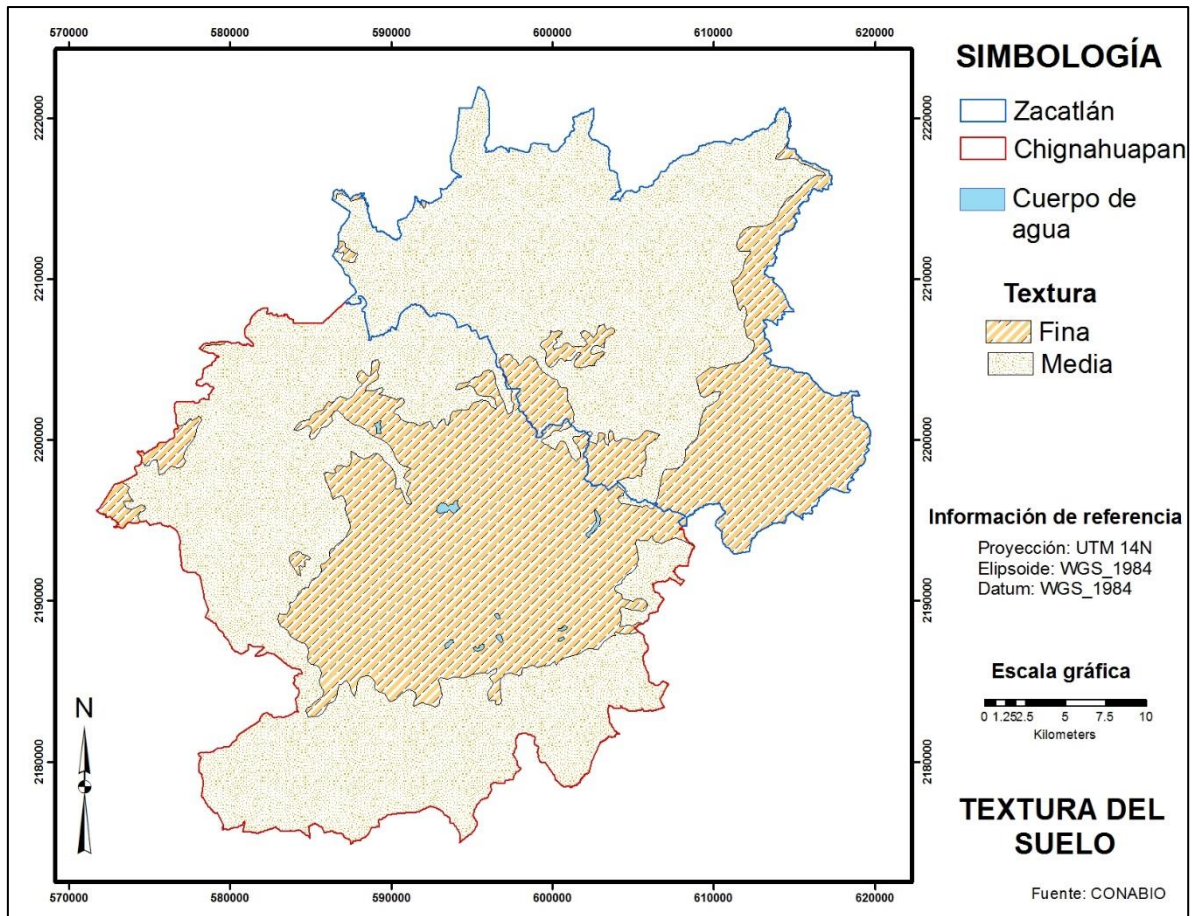


Figura 18. Clases textural del suelo, presentes en los municipios de Chignahuapan y Zacatlán.

Profundidad del suelo

Esta propiedad del suelo es un factor condicionante para el desarrollo de las raíces y la disponibilidad de humedad y nutrientes para las plantas. Los suelos superficiales son más susceptibles a la erosión, dependiendo de la interfase entre el suelo y el lecho rocoso (MAVDT, 2003). Para crear este mapa se utilizaron las fases físicas del suelo, proporcionadas en el mapa digital de Edafología de CONABIO, asociando cada fase con determinada profundidad (Figura 19).

La fase física del suelo, se define de acuerdo a la presencia y abundancia de elementos sólidos de grava, piedra, o capas fuertemente cementadas. Suelos con

fases dúrica, lítica y pedregosa tiene una profundidad de hasta 0.5 m, las fases dúrica y lítica profunda cuentan con una profundidad de 0.5 a 1 m y los suelos sin fase tienen una profundidad mayor a 1 m (INEGI, 1998).

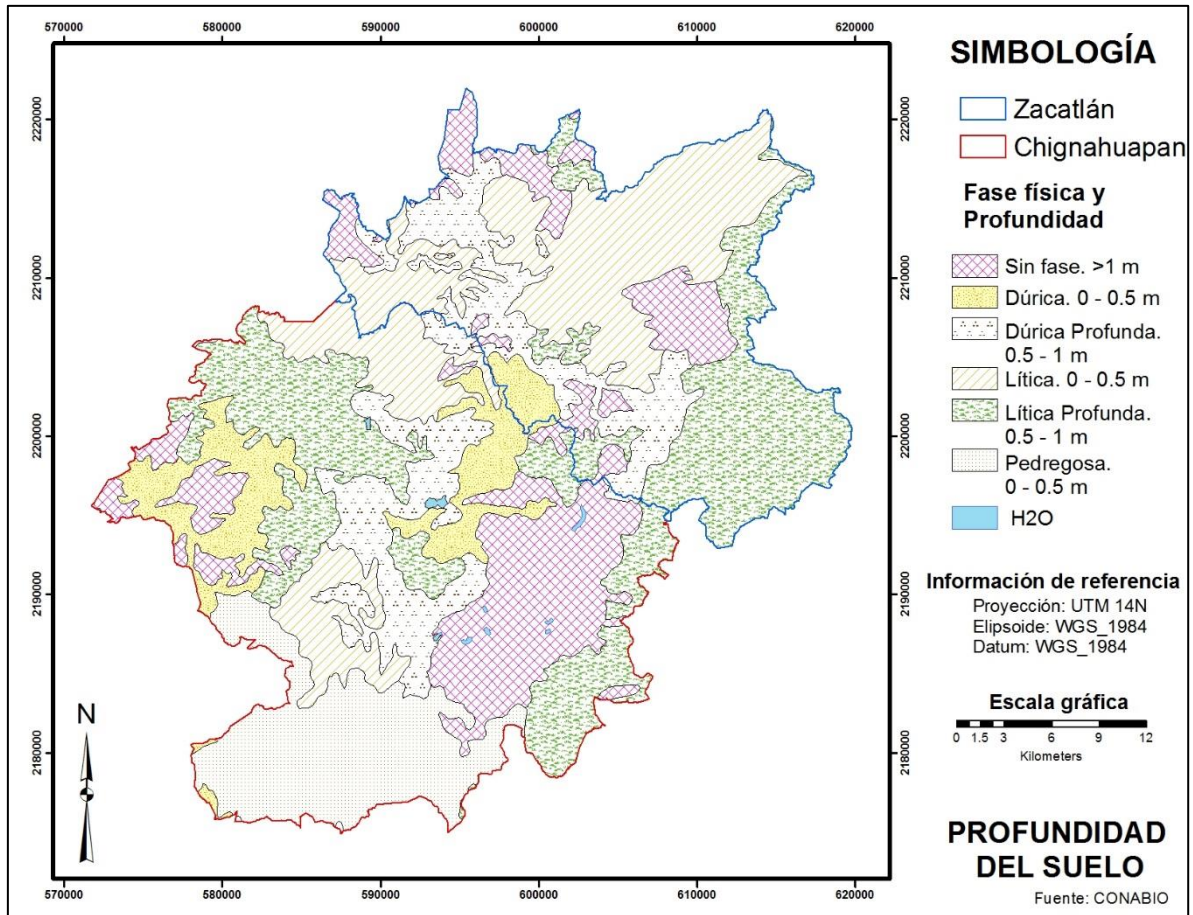


Figura 19. Mapa de profundidad del suelo presente en el área de estudio (Chignahuapan-Zacatlán).

Domina la profundidad de 0 a 0.5 m, abarcando una superficie de 52,243 ha aproximadamente, seguida por la profundidad de 0.5 a 1 m la cual ocupa 49,332 ha, la profundidad con menor superficie es la de mayor de 1 m, con 23,080 hectáreas.

Permeabilidad

La permeabilidad del suelo es importante, dado que representa la velocidad a la cual el agua de lluvia se mueve a través del suelo (Gayoso y Alarcón, 1999). El mapa de

permeabilidad para la zona de estudio, se creó a partir del mapa digital proporcionado por CONABIO denominado Hidrogeología (Figura 20); en el cual es posible constatar que en el área de estudio domina la permeabilidad media a alta en el 92% de la superficie.

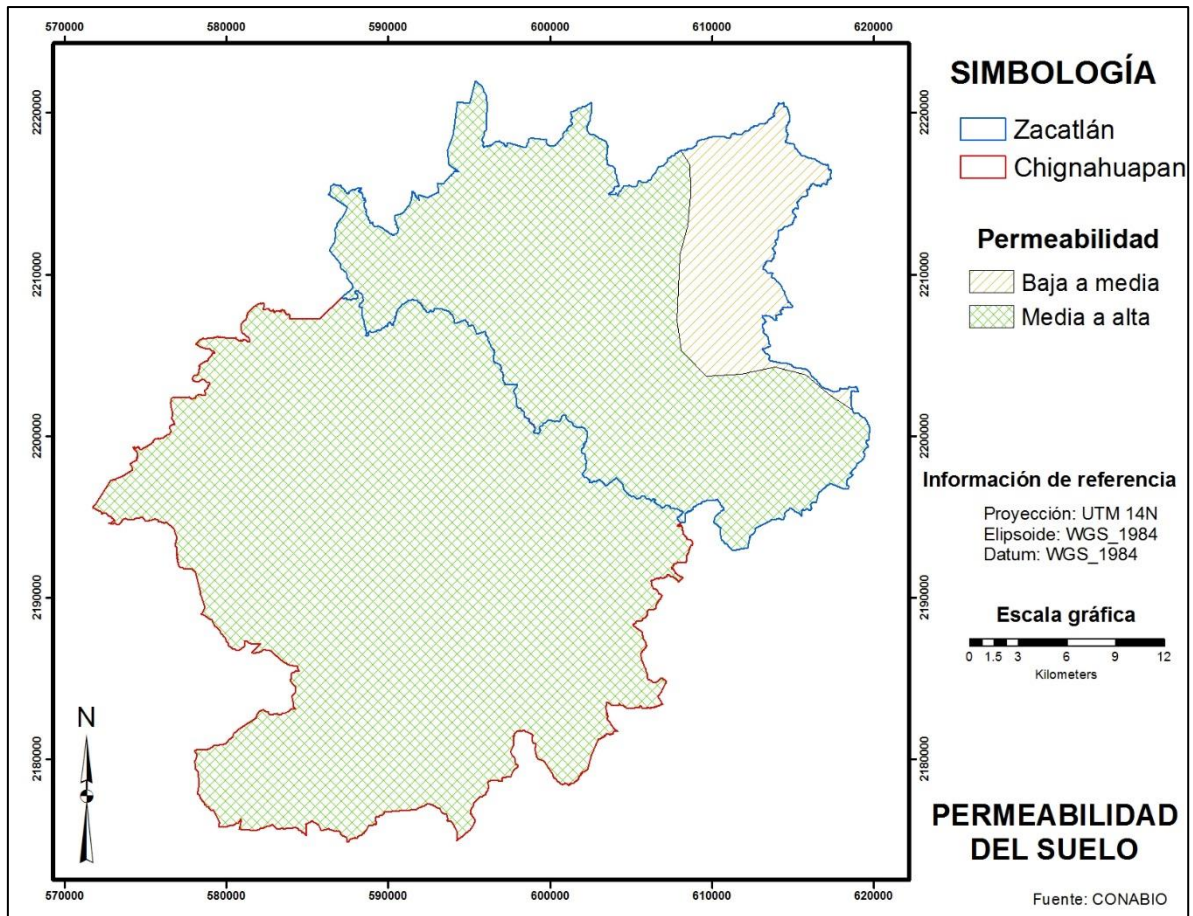


Figura 20. Distribución de la permeabilidad del suelo presente en los municipios de Chignahuapan y Zacatlán.

El tipo de permeabilidad de media a alta, puede permitir el flujo del agua en cantidades suficientes como para conformar zonas de recarga, y constituir acuíferos capaces de sustentar a poblaciones y actividades económicas de mediana escala (Avalos y Baca, 2007).

Pendiente

La pendiente es un criterio indispensable en este tipo de estudios, por ser determinante en la estabilidad de los suelos, este mapa (Figura 21) se generó en el programa IDRISI Selva con el modulo Surface Analysis/Topographic variables/Slope, a partir del modelo de elevación creado para el área de estudio con una resolución de 30 m, editado por Chávez (2014).

Las clases de pendiente se definieron considerando los siguientes puntos: 0° a 10° son áreas relativamente planas donde no habrá pérdidas considerables de suelo, independientemente del tipo de cultivo o de la presencia de lluvias intensas; de 10° a 20° son zonas donde la erosión que se presenta se puede controlar con obras y prácticas de conservación de suelos; en las zonas entre 20° y 30° el riesgo de erosión es más alto y más complicado de controlar; en las áreas con mayor de 30° el riesgo de erosión es muy alto y difícil de controlar (Posner *et al.*, 2003).

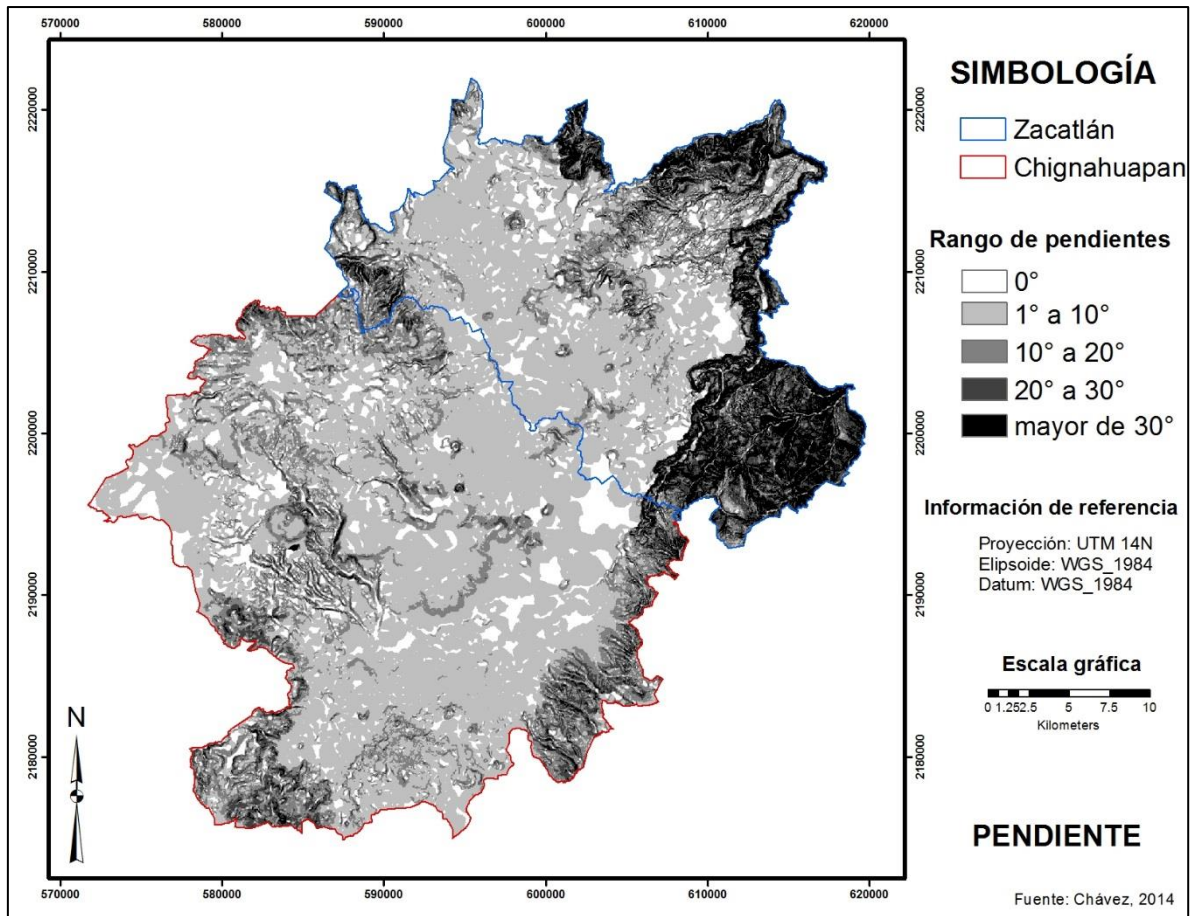


Figura 21. Mapa de pendientes presentes del área de estudio (Chignahuapan-Zacatlán).

Erosión

El mapa de erosión se creó con el Índice de Vegetación Normalizada (NDVI), el cual se basa en el principio de combinación de la banda roja (R) e infrarrojo cercano (IR) del espectro. Teóricamente, los valores de NDVI se representan como una relación que varía en valor de -1 a 1, en forma práctica los valores negativos extremos representan el agua, los valores alrededor de cero representan el suelo desnudo y los valores de más de 0.6 representan vegetación verde densa (Gilabert *et al.*, 1997). Se utilizaron dos imágenes del satélite Landsat 5 TM tomadas en el mes de abril del año 2011, con los path y row 26_46 y 25_46. El algoritmo utilizado es:

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

Donde:

NDVI = Índice de vegetación de diferencia normalizada

IRC = Infrarojo cercano

IR = Banda roja

En el programa IDRISI Selva con el módulo VegIndex, se utilizó la banda roja (banda 3) y la banda del infrarrojo cercano (banda 4) para generar el mapa de erosión. El mapa resultante tiene valores de -0.54 a 0.74, se reclasifico (Reclass) con los rangos del Cuadro 7, para determinar el grado de erosión presente y generar el mapa correspondiente (Figura 22). Se tomaron los valores de NDVI como indicadores directos de erosión, dado que los valores cercanos a cero y valores negativos indican las áreas con ausencia de vegetación y por lo tanto son las zonas con suelo expuesto, las cuales son las más vulnerables a la erosión.

Cuadro 7. Rangos para definir el grado de erosión (elaboración propia, basado en Gilabert *et al.*, 1997)

Grado de erosión	Valores desde justo	Valores desde antes que
Nula	0.75	0.55
Ligera	0.55	0.34
Moderada	0.34	-0.06
Severa	-0.06	-0.54

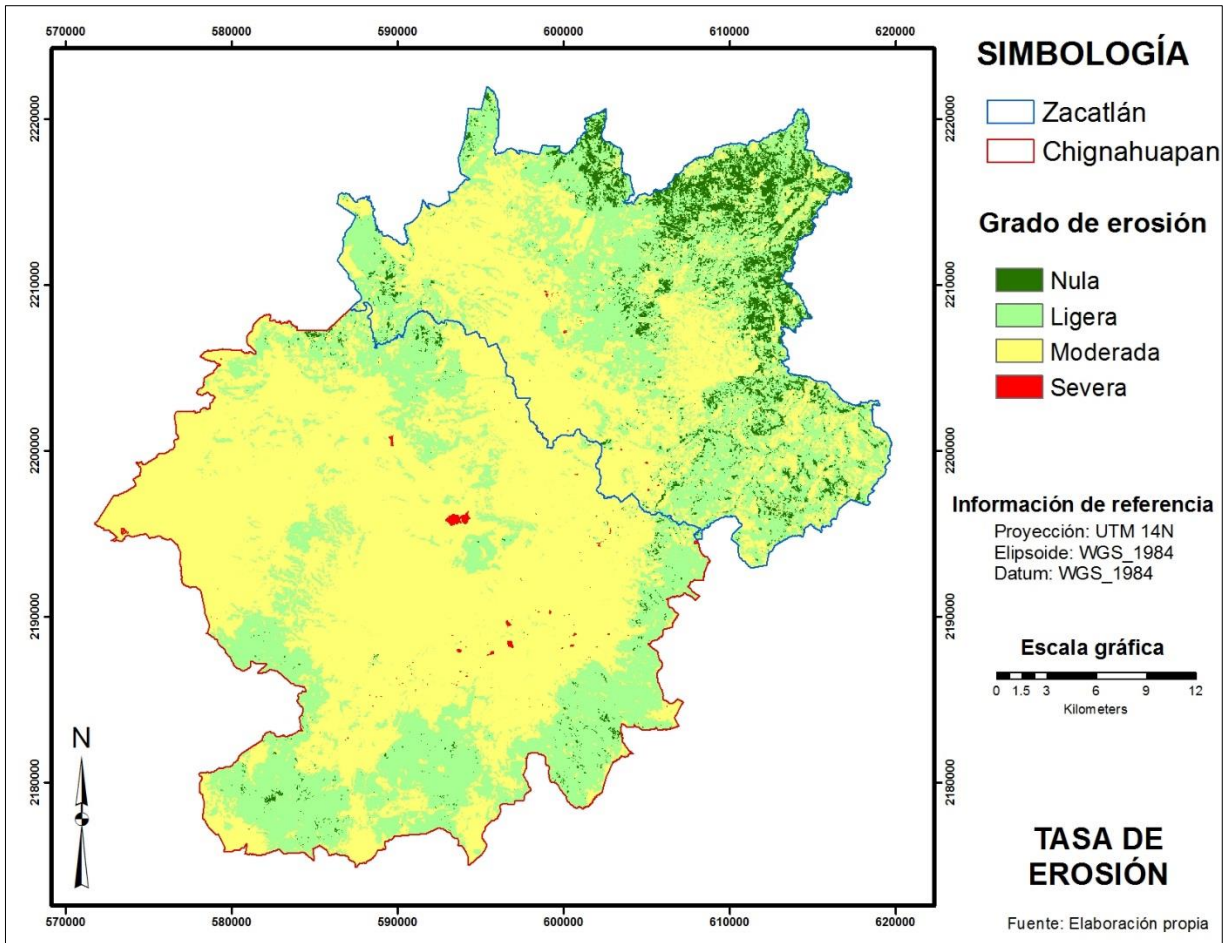


Figura 22. Variación de la tasa de erosión presente en la región Chignahuapan-Zacatlán.

Cobertura y uso del suelo

El uso actual de la tierra, reflejado principalmente en la cobertura vegetal, es un factor importante para determinar el riesgo de erosión (Posner *et al.*, 2003). El mapa se generó a partir de la clasificación supervisada que se realizó a las imágenes de satélite Landsat TM 5 que cubren el área de estudio. Las clases que se utilizaron para la clasificación son bosque, cuerpos de agua, áreas sin vegetación (incluye áreas urbanas) y zonas de uso agropecuario (Figura 23).

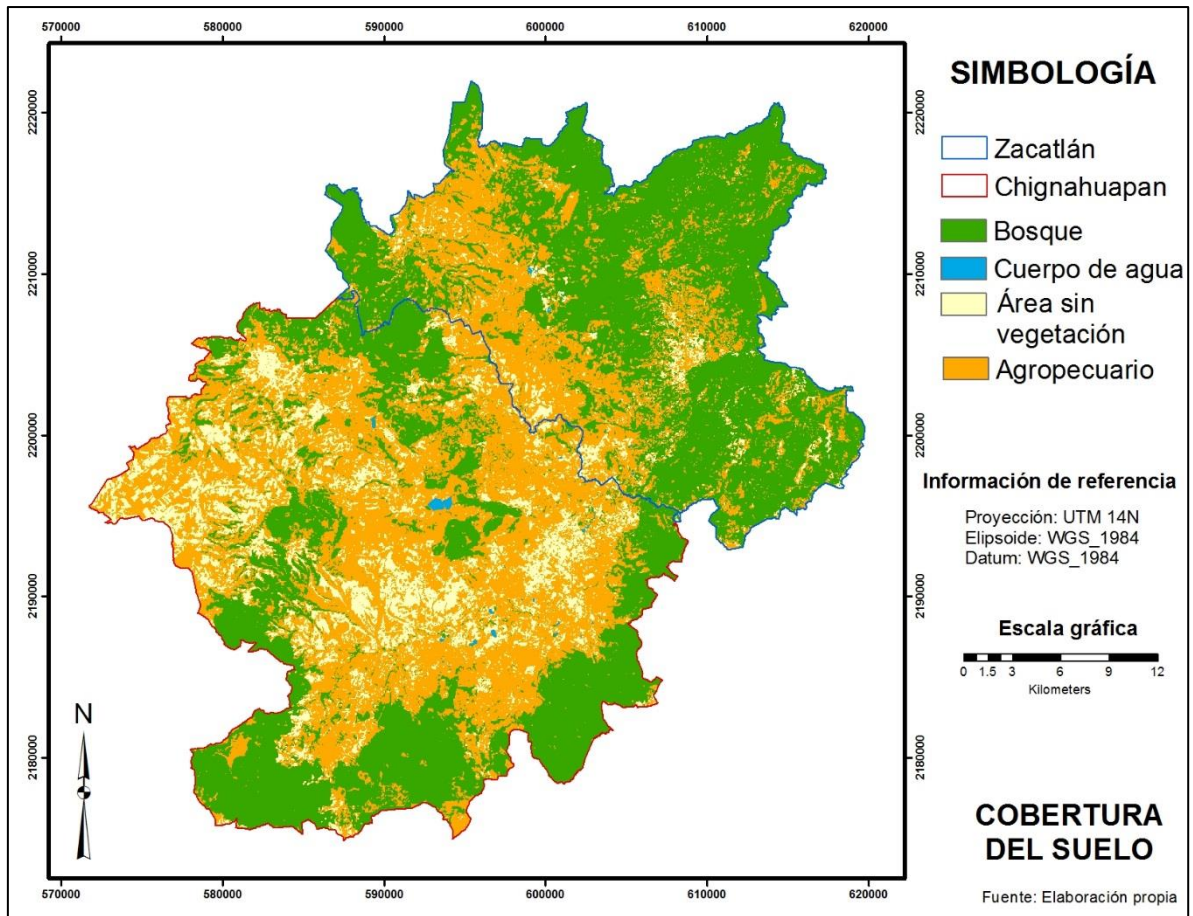


Figura 23. Mapa de la cobertura y uso del suelo en el área de estudio (Chignahuapan-Zacatlán).

Vegetación secundaria

Se consideró como vegetación secundaria, aquellas áreas en donde existe algún indicio de que la vegetación original fue eliminada o perturbada a un grado en el que ha sido modificado profundamente (INEGI, 1997). Se generó el mapa a partir del mapa digital Uso del suelo y vegetación serie III de INEGI. En la zona de estudio existen 7,351 hectáreas aproximadamente con presencia de vegetación secundaria (Figura 24), a pesar de que los datos contenidos en la capa de información corresponden a los años 2002 y 2003, la información se considera vigente, ya que el uso del suelo en la zona de estudio se mantiene hasta la actualidad.

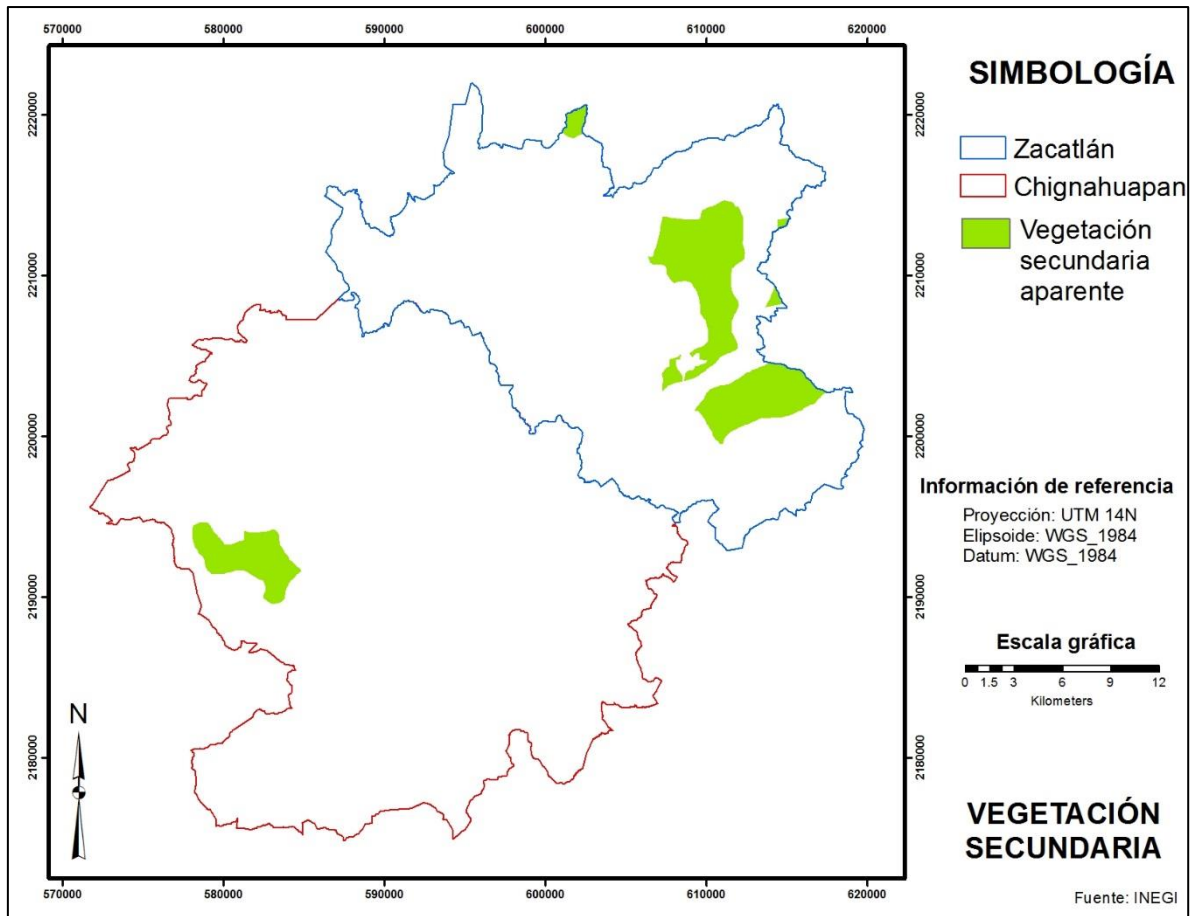


Figura 24. Ubicación de las áreas con presencia de vegetación secundaria en la zona de estudio (Chignahuapan-Zacatlán).

Vegetación densa

El mapa fue generado a partir de la clasificación digital supervisada que se realizó a las imágenes de satélite Landsat TM 5 que cubren el área de estudio. Las clases que se utilizaron para la clasificación son bosque, cuerpos de agua, áreas sin vegetación. En este caso se utilizó únicamente la clase denominada Bosque, en el área de estudio existen aproximadamente 57,907 ha clasificada con esta categoría (Figura 25).

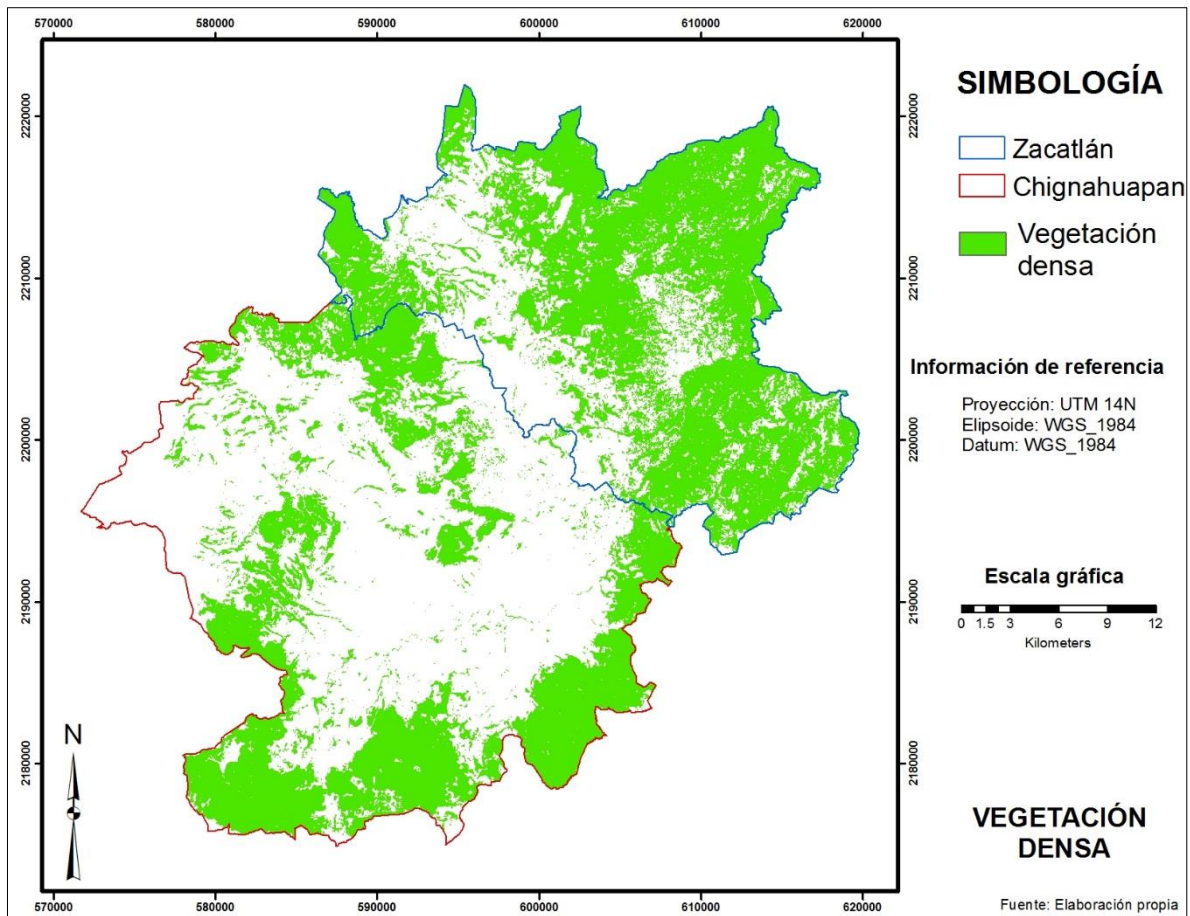


Figura 25. Zonificación de la vegetación densa en el área de estudio (Chignahuapan-Zacatlán).

2.3.3. Evaluación Multicriterio. Proceso Analítico Jerarquizado (PAJ)

La metodología PAJ utilizada se describió ampliamente en el apartado 1.3.6. del capítulo I; se puntualizó el proceso que sigue este método y se indicó el primer paso de este proceso, que es la descomposición del problema en jerarquías (Figura 5). A continuación se describe brevemente el proceso llevado a cabo.

Estandarización de criterios

Los mapas de criterios, obtenidos de la base de datos, poseen diferentes escalas de medida; el PAJ requiere que los valores de estos sean transformados a unidades

comparables para poder correr el modelo cartográfico (Malczewski, 1999). Primero se estableció la prioridad relativa de cada clase o rango que comprendía cada criterio, basándose en el objetivo del problema y las alternativas de evaluación; para lo cual se definieron 5 niveles de prioridad: S1, S2, S3, N1 y N2; donde S1 representa el rango o clase que determina la Máxima prioridad, S2 el que determina Alta prioridad, S3 Media prioridad, N1 Baja prioridad y N2 el rango o clase que identifica las áreas no prioritarias. En los Cuadros 8, 9, 10 y 11 se muestra el proceso descrito anteriormente para cada criterio y subcriterio.

Cuadro 8. Clasificación de los valores para estandarizar el criterio Clima.

PRECIPITACIÓN (mm)	
Rango	Valor
600 - 800	S1
800 - 1200	N1
1200 - 1500	S3
1500 - 2000	S3
2000 - 2500	S2
2500 - 4000	S2

Cuadro 9. Clasificación de los valores para estandarizar el criterio Suelo.

Subcriterio	Rango/Tipo	Valor
HUMEDAD*	2	S1
	8	S3
	10 a 12	N1
TEXTURA	Fina	S1
	Gruesa	S2
	Media	S3
PROFUNDIDAD	0 - 1 m	S1
	> 1 m	N1
PERMEABILIDAD	Media a alta	S3
	Baja a alta	S2
	Baja a media	S1
	Baja	S1
	Alta	N1

EROSIÓN	Severa	S1
	Media	S2
	Leve	S3
	Nula	N2

*Número de meses que permanece con humedad el suelo

Cuadro 10. Clasificación de los valores para estandarizar el criterio Topografía.

PENDIENTE (°)	
Rango	Valor
0 a 10	N1
10 a 20	S3
20 a 30	S2
> 30	S1

Cuadro 11. Clasificación de los valores para estandarizar el criterio Cobertura vegetal.

Subcriterio	Tipo	Valor
USO DEL SUELO	Agrícola	S1
	Bosque	N1
	Matorral	S2
	Pastizal	S1
	Sin vegetación	S1
VEGETACIÓN DENSA	Presente	N1
	Ausente	S1
VEGETACIÓN SECUNDARIA	Presente	S2
	Ausente	S1

Una vez determinada la importancia relativa de los criterios y subcriterios, se realizó la estandarización mediante el método de comparación pareada. Se ejemplifica este procedimiento con el criterio precipitación (Cuadro 12).

Cuadro 12. Matriz de comparación pareada del subcriterios Precipitación.

Precipitación	S1	S2	S3	N1	N2
S1	1				
S2	1/2	1			
S3	1/5	1/3	1		
N1	1/7	1/6	1/4	1	
N2	1/9	1/7	1/3	1/2	1

Con los valores obtenidos de la comparación pareada, se utilizó el método del valor máximo, este método es sencillo y consiste en dividir cada valor por el máximo para obtener los valores estandarizados, este método se representa con la siguiente ecuación:

$$m_i = \frac{x_{ii}}{\max. x_{ii}}$$

En el Cuadro 13 se muestran los valores estandarizados para dicho criterio. La estandarización del resto de los subcriterios se muestra en el Anexo 2.

Cuadro 13. Valores para estandarizar el subcriterio precipitación

CLASE	VALOR
S1	1
S2	0.6228
S3	0.2699
N1	0.1157
N2	0.0837

Una vez estandarizados cada uno de los subcriterios, se generaron los mapas denominados "criterio". Este procedimiento se realizó con el programa IDRISI Selva, haciendo una reclasificación de los valores originales de los mapas, por los valores obtenidos en la estandarización.

2.3.4. Ponderación de los criterios y subcriterios (W)

El objetivo de la ponderación o asignación de pesos, es expresar en términos cuantitativos, la importancia de los distintos elementos para favorecer o ser afectados por una determinada actuación. Este proceso es un aspecto que puede crear controversias, ya que no existe un método generalmente aceptado para la determinación de los pesos (Barredo, 2005).

Una vez construida la estructura jerárquica del problema, el segundo paso del PAJ es la valoración de los elementos. Cada experto debe emitir sus juicios de valor o preferencias en cada uno de los niveles jerárquicos establecidos. Este proceso se realizó mediante la comparación por pares.

El PAJ permite realizar las comparaciones tanto en factores cuantitativos como cualitativos, dado que utiliza la escala diseñada por Saaty (1980), la cual se muestra en el Cuadro 2. Este tipo de escala permite al experto incorporar subjetividad, experiencia y conocimiento, consta de valores que van del 1 al 9 para describir la intensidad de la importancia de un criterio sobre otro (Malczewski, 1999).

Para la estimación de los pesos (W), se requirió del apoyo de expertos y especialistas en el tema de restauración. Un experto se define como “aquel individuo cuya situación y recursos personales le posibiliten contribuir positivamente a la consecución del fin que ha motivado la iniciación del trabajo y que puede a su vez aportar una perspectiva relevante a la investigación (Landeta, 1999). Malla y Zabala en 1978, citados por Ortega (2008), consideran que un grupo de 15 a 20 expertos puede ser metodológicamente viable.

Se diseñó y validó la encuesta que se presenta en el Anexo 3. Dicha encuesta se aplicó tanto personalmente como por vía electrónica y/o videoconferencia a 72 expertos o especialistas, sin embargo sólo se recibió respuesta de 21 expertos (Anexo

4). Los datos de las matrices recibidas se procesaron en el programa IDRISI Selva con el modulo GIS Anaysis/Decisión Support/Weight.

Mediante este procedimiento se obtuvieron los pesos y la consistencia de las respuestas. Una vez que se tuvieron los resultados, se tomaron en cuenta solo 14 encuestas, siendo estas las que cumplían con el criterio de consistencia (< 0.10). Los resultados consistentes se promediaron para cada criterio y subcriterio, generando así los pesos (W) de cada uno de ellos en la jerarquía determinada (Anexo 5).

Para ejemplificar el proceso anterior, en el Cuadro 14 se muestra los resultados obtenidos de la encuesta a un experto:

Cuadro 14. Matrices de comparación pareada y pesos obtenidos de una encuesta al experto.

CRITERIOS	Clima	Suelo	Topografía	Cobertura vegetal	Perturbación	Pesos
Clima	1					0.2693
Suelo	1	1				0.2788
Topografía	1/2	1	1			0.2337
Cobertura vegetal	1	1/2	1	1		0.2181

Consistencia = 0.03

SUBCRITERIO	Textura	Profundidad	Permeabilidad	Erosión	Humedad	Pesos
Textura	1					0.2260
Profundidad	1/2	1				0.0973
Permeabilidad	1/2	1	1			0.0973
Erosión	1	5	5	1		0.4656
Humedad	1	1	1	1/7	1	0.1137

Consistencia = 0.06

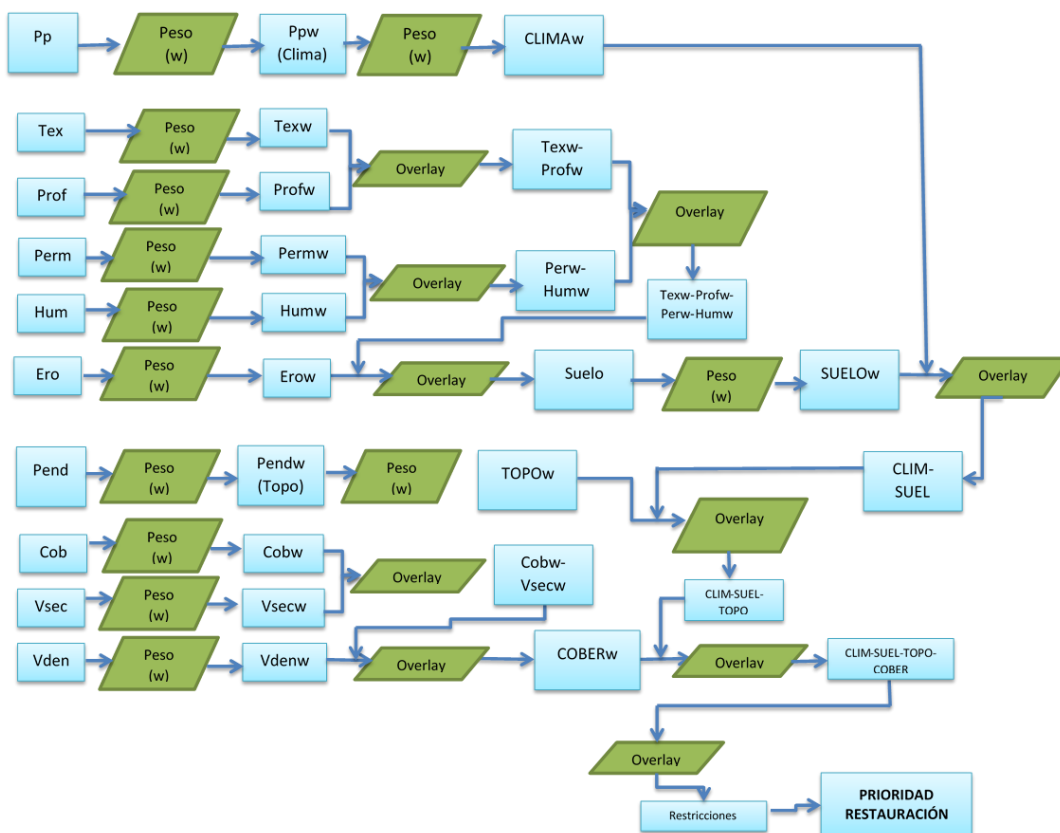
SUBCRITERIO	Tipo de vegetación	Vegetación secundaria	Vegetación densa	Pesos
Tipo de vegetación	1			0.2583
Vegetación secundaria	1/3	1		0.1047
Vegetación densa	3	5	1	0.6370

Consistencia = 0.03

2.3.5. Modelación cartográfica

El modelado cartográfico describe el uso de las funciones básicas de un SIG en una secuencia lógica para resolver problemas espaciales complejos. El modelado espacial todavía va más allá en la búsqueda de la resolución de dichos problemas, ya que en éste se integran otras técnicas de análisis ajenas a las funciones básicas de los SIG (Barredo, 2005).

El PAJ se implementó en el programa IDRISI Selva mediante el módulo Modeling/Model Deployment Tools/Macro Modeler, en donde se diseñó el modelo cartográfico para obtener el mapa preliminar de áreas prioritarias para restauración ecológica (Figura 26).



Pp: precipitación; Tex: textura; Porf: profundidad del suelo; Perm: permeabilidad del suelo; Hum: humedad del suelo; Ero: erosión; Pend: pendiente; Cob: cobertura del suelo; Vsec: vegetación secundaria; Vden: vegetación densa; Loc: cercanía a localidades y Cam: cercanía a caminos.

Figura 26. Modelo cartográfico para generar el mapa de áreas prioritarias para restauración ecológica.

Los mapas de los subcriterios estandarizados se multiplicaron por el peso (W) asignado por los expertos, para obtener los mapas ponderados. Estos mapas se sumaron (overlay), dando como resultado los mapas de criterios (clima, suelo, topografía y cobertura vegetal). Cada criterio se multiplicó por el peso definido por los expertos (Cuadro 16). Para obtener el mapa preliminar de áreas prioritarias para restauración ecológica, los mapas de los criterios resultantes fueron sumados.

2.3.6. Restricciones

Para obtener el mapa final de áreas prioritarias para restauración ecológica, fue necesario considerar criterios limitantes que restringen la disponibilidad de algunas alternativas de acuerdo al objetivo. Se consideraron como restricciones las carreteras pavimentadas y caminos de terracería, cuerpos y corrientes de agua y zonas urbanas.

De cada una de las restricciones se generaron mapas binarios (clasificados con valores de 0 y 1), en donde las áreas consideradas restricciones se les asignó el valor de 0 y las áreas consideradas dentro del análisis se les asignó el valor 1. Con estos mapas binarios se generó un modelo cartográfico (Figura 27) en donde se multiplicó cada uno de ellos con el mapa preliminar de áreas prioritarias, con la finalidad de que las restricciones sean eliminadas. Este proceso se realizó con el módulo Modeling/Model Deployment Tools/Macro Modeler del programa IDRISI Selva.

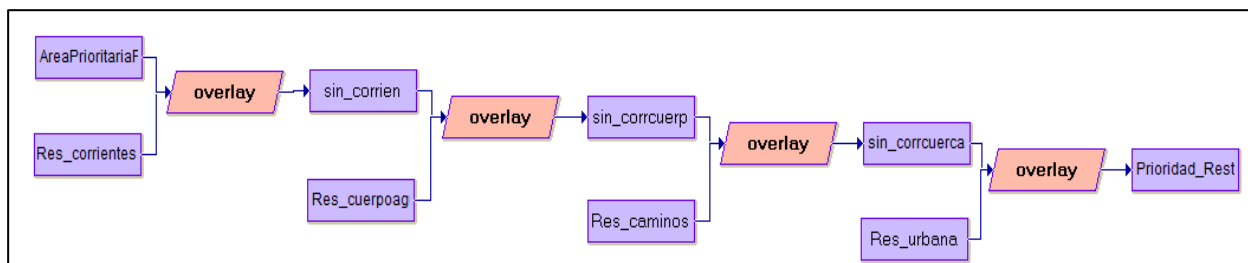


Figura 27. Modelo cartográfico para eliminar las restricciones del mapa de áreas prioritarias.

2.3.7. Generación del mapa de áreas prioritarias para restauración ecológica

Finalmente, el mapa resultante de aplicar el modelo cartográfico de las restricciones, se clasificó en 5 categorías de prioridad de atención (Cuadro 15). Con esta clasificación se obtuvo el mapa final de áreas prioritarias para restauración ecológica.

Cuadro 15. Clasificación (valores) para obtener el mapa de las áreas prioritarias para restauración ecológica.

Prioridad	Valores
Máxima	1 – 0.75
Alta	0.74 – 0.65
Media	0.64 – 0.60
Baja	0.59 – 0.40
No prioritaria	0.39 - 0

2.3.8. Verificación en campo

El proceso de verificación, es una comprobación de los resultados obtenidos en el medio real, dicho de otra manera, es comprobar el grado de acuerdo entre los datos arrojados por el modelo y los datos del sistema real (Barredo, 2005).

Los modelos elaborados y ejecutados a partir de los métodos y técnicas de la EMC espacial, como otros problemas abordados en un entorno SIG, no se les ha prestado demasiada atención a la validación final de los resultados, esto debido a la falta de procedimientos y herramientas adecuadas. La consecuencia de ello, es que normalmente los problemas abordados no suelen ir acompañados de un procedimiento de corroboración que, como mínimo, aporte alguna información sobre el riesgo final que es asumido en la toma de decisiones.

Por ello, del mapa final se eligieron 98 puntos al azar y se consideraron 20 puntos por prioridad de atención (Chuvieco, 2008).

2.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El mapa de erosión generado para la zona de estudio (Figura 22), indica que hay 183 hectáreas con erosión severa, representando el 0.15% del área de estudio; el 60.2% de la superficie total se clasificó con erosión moderada, lo que equivale a 75,255 hectáreas; la categoría de erosión ligera abarca una superficie de 43,557 hectáreas ocupando el 34.8% de la zona de estudio. y la superficie con erosión nula es de 5,867 ha, lo que representa el 4.7% de la superficie total. Estos resultados son congruentes con los datos obtenidos en la priorización de las áreas con necesidad de restauración, esto confirma las zonas que deberán ser atendidas a la brevedad.

Una fase crucial para la aplicación de los métodos de evaluación multicriterio es la asignación de pesos a los criterios. El criterio cobertura vegetal fue el que obtuvo el menor número de matrices consistentes con solo 7 de las 14 generadas, le siguió el criterio suelo con 12 matrices consistentes. La opinión de los expertos fue variable, ya que hubo diferencia de entre valores máximos y mínimos de hasta 0.73, tomando en cuenta que la escala es de 0 a 1, las diferencias de opinión son radicales. Esto probablemente sea debido a que los expertos son de diferentes partes del país, incluso 4 de ellos son extranjeros, además de que han trabajado en distintas condiciones ambientales y ecosistemas. Por ello, se utilizaron los promedios de los vectores calculados de las matrices consistentes, para compensar estas variaciones. Los pesos (w) resultantes del proceso se muestran en el Cuadro 16.

Cuadro 16. Resumen de los resultados de las matrices de comparación pareada y pesos asignados a cada criterio de evaluación.

Criterio/Subcriterio	Peso
Clima	0.0856
Suelo	0.2843
Topografía	0.3048
Cobertura vegetal	0.3254
Textura	0.1409
Profundidad	0.1478
Permeabilidad	0.1268
Erosión	0.4296
Humedad	0.155
Tipo de vegetación	0.5674
Vegetación secundaria	0.1388
Vegetación densa	0.2938

En la Figura 28 se muestra la localización y distribución de las áreas potenciales para llevar a cabo restauración ecológica clasificadas por su orden de prioridad y en el Cuadro 17 se indica la superficie que ocupa cada categoría en el área de estudio.

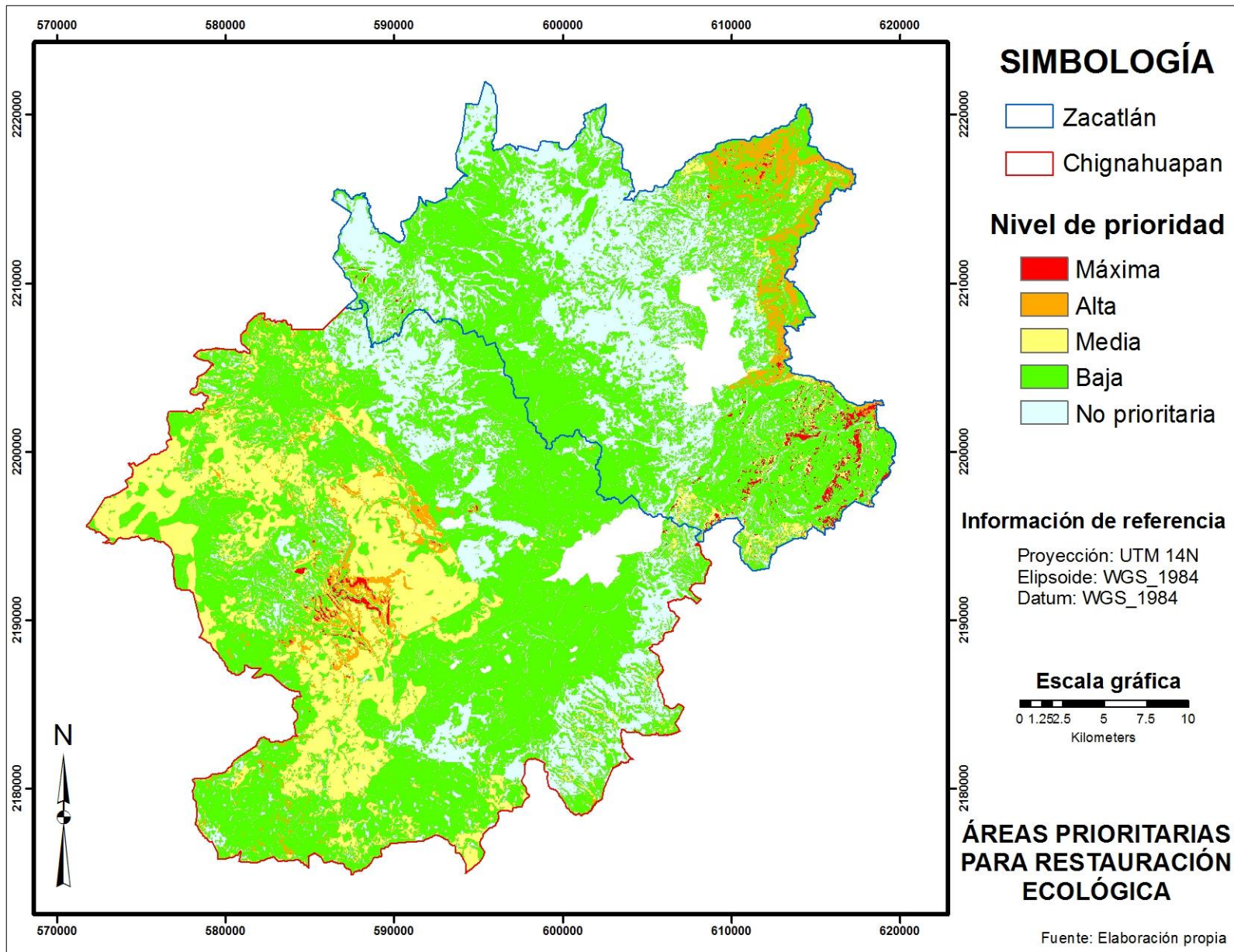


Figura 28. Mapa de áreas prioritarias para restauración ecológica en Chignahuapan y Zacatlán.

Cuadro 17. Superficie ocupada por prioridad de restauración

PRIORIDAD	CHIGNAHUAPAN ¹		ZACATLÁN ²		TOTAL ³	
	Superficie (ha)	Superficie (%)	Superficie (ha)	Superficie (%)	Superficie (ha)	Superficie (%)
Máxima	271.6	0.36	707.0	1.44	978.6	0.78
Alta	1,894.0	2.49	2,344.5	4.79	4,238.5	3.39
Media	15,899.4	20.91	1,518.7	3.10	17,418.1	13.94
Baja	44,332.0	58.31	26,596.9	54.35	70,928.8	56.76
No prioritaria	10,878.8	14.31	15,293.3	31.25	26,172.2	20.95
Total	73,275.8		46,460.4		119,736.2	

1. Superficie total de Chignahuapan, 76,023 hectáreas

2. Superficie total de Zacatlán, 48,933 hectáreas

3. Superficie total del área de estudio de 124,956 hectáreas

La superficie que no se muestra en el Cuadro 17 es la correspondiente a las restricciones, explicado en el punto 2.3.6. Restricciones. Con base en el mapa generado, en el área de estudio la prioridad de restauración dominante es la prioridad baja, abarcando el 56.7% de la superficie total, cubriendo principalmente las áreas con vegetación boscosa y destinadas a la silvicultura. En algunos casos, en las áreas bajo manejo se implementan medidas de mitigación y en conjunto con la cobertura vegetal presente, se disminuye (en cierta medida) la degradación de la zona. En segundo lugar de importancia se encuentran las áreas no prioritarias, ocupan el 21% del área de estudio aproximadamente, la mayoría de esta superficie son áreas con vegetación boscosa densa.

El 14% de la superficie, se encuentra clasificada como prioridad de restauración media, la mayor parte de la superficie son áreas destinadas a la agricultura y ganadería, en algunos casos estas zonas se encuentran con problemas de erosión. Las áreas de prioridad alta de restauración se encuentran en la parte noreste del municipio de Zacatlán, en zonas de fuertes pendientes y en la parte central del municipio de Chignahuapan, en áreas que en algún momento fueron destinadas a actividades agropecuarias. Por el momento, no representan un punto de alarma, dado que sólo están ocupando el 3.3% de la superficie total, sin embargo esta situación no debe ser tomada a ligera, ya que si esta situación no es atendida, estas áreas pueden incrementarse considerablemente.

La prioridad máxima de restauración, ocupa 0.78% de la superficie total de la región de estudio, el municipio de Zacatlán cuenta con la mayor superficie bajo esta categoría, principalmente se encuentran en zonas con pendientes mayor del 40% y destinadas a la agricultura. Estas áreas deben atenderse de manera urgente, dado que aún cuentan con suelo fértil, lo que hace más fácil la recuperación de la zona, y aminora los costos de las actividades a realizar, esto se pudo constatar en los recorridos en campo realizados.

En la verificación de campo, se comprobó que las características presentes en el mapa (pendiente, erosión, cobertura vegetal, vegetación secundaria y vegetación densa) estuvieran presentes en el terreno. Se obtuvo el 75% de certeza. En las Figuras 29; 30, 31, 32 y 33 se muestran las condiciones presentes en el área de estudio.



Figura 29. Vista general de un sitio representativo de Máxima prioridad.



Figura 30. Vista general de un sitio representativo de Alta prioridad.



Figura 31. Vista general de un sitio representativo de Mediana prioridad.



Figura 32. Vista general de las un sitio representativo de Baja prioridad.



Figura 33. Vista general de las áreas no prioritarias.

El uso de la EMC en la solución de los problemas sobre recursos naturales tiene poco tiempo, sin embargo se ha incrementado considerablemente su uso y especialmente en la determinación de sitios prioritarios con distintos fines de conservación, restauración, manejo, entre otros. Como el trabajo realizado por Echeverría *et al.* (2010), quienes determinaron los niveles de prioridad para restaurar 36 cuencas con distintos tipos de uso de suelo, en la Comuna de Casablanca, Chile. Las cuencas se sometieron a un análisis multicriterio, el análisis consideró diversos indicadores del tipo socioeconómico y ambiental llevados a nivel de cuenca, cada

uno de los indicadores fueron sumados sin ponderación y se generó un índice de priorización para las 36 cuencas.

Los siguientes estudios de priorización han aplicado técnicas de EMC basadas en SIG: Bojórquez-Tapia *et al.* (2004) consideraron prioridades de conservación para el rediseño del Parque Nacional de Sierra San Pedro Mártir en Baja California en México, Geneletti (2004) clasificó los remanentes de bosque según su prioridad para la conservación en un Valle Alpino. Así mismo, Cipollini *et al.* (2005) utilizaron esta técnica para identificar los objetivos de restauración y cuantificar las opiniones de expertos para dar prioridad a las actividades de restauración en 112 praderas en la región de Conservación de los Apalaches en el sur de Ohio, E.U.A. Finalmente, Marjokorpi y Otsamo (2006) propusieron una metodología para rehabilitar las tierras forestales degradadas y conservar los bosques que quedan en Kalimantan, Indonesia.

2.5. CONCLUSIONES

De acuerdo con el estudio realizado, en los municipios de Chignahuapan y Zacatlán se tienen 5,217 hectáreas con necesidad de ser restauradas lo más pronto posible, esta superficie corresponde a las áreas categorizadas como de máxima y alta prioridad, en especial el municipio de Zacatlán tendrá que poner mayor atención a estas zonas, dado que en este municipio es donde se encuentra la mayoría de la superficie con problemas, como se aprecia en la Figura 29.

La técnica de Evaluación Multicriterio denominada Proceso Analítico Jerarquizado, es idónea, para la identificación de áreas prioritarias y para la priorización de actividades, dada la capacidad que tiene para combinar múltiples criterios de decisión, incorporar los juicios y opiniones de las diferentes partes interesadas y tratar información espacial. A pesar de ello, la EMC tiene limitaciones y los resultados deben ser tomados con precaución para que la toma de decisiones sea lo más apropiada posible.

Una de las limitantes es la falta de información detallada, esto puede causar que los criterios propuestos sean imposibles de usar de manera práctica. Por lo que, al momento de seleccionar los criterios, es importante tener en cuenta que la información necesaria para llevar a cabo el proceso esté disponible.

La calidad de los resultados sobre el establecimiento de prioridades de restauración, depende en gran medida de tener claros los objetivos que se desea llevar a cabo, ya que diferentes objetivos implican diferentes prioridades. Otro elemento igual de importante son los criterios, que están íntimamente conectados a los objetivos de restauración; estos deben ser seleccionados de manera adecuada, y deben estar adaptados a un contexto específico, teniendo en cuenta la contribución de los expertos en restauración y las necesidades de las comunidades locales. Para que un trabajo de restauración tenga éxito, debe hacerse con la gente y para la gente.

Por lo que se concluye, que el enfoque multicriterio propuesto proporciona una herramienta fiable para evaluar la necesidad que tiene el territorio para llevar a cabo actividades de restauración ecológica. La identificación de las prioridades puede mejorar de manera considerable mediante la aplicación de técnicas de optimización espacial. Se espera que la identificación de las áreas con prioridad de restauración realizada en el presente estudio, sea el paso inicial de un proyecto a largo plazo que tenga la finalidad de restaurar los ecosistemas de los municipios en cuestión, y que además el proyecto se encuentre formando parte de un programa de ordenamiento territorial, lo cuál sería ideal para tener resultados exitosos.

Con el reconocimiento de estas áreas, se tiene una visión generalizada de las zonas que son más vulnerables y propensas a la degradación, ya sea por las actividades antropogénicas realizadas o por su ubicación geográfica. Lo cuál debe ser tomado en cuenta para tomar las acciones que sean necesarias e impedir que más zonas sean degradadas al punto de perder sus funciones ambientales y requerir de ayuda para su recuperación. El objetivo final de todo trabajo de restauración es el

restablecimiento de los bienes y servicios que los ecosistemas proporcionan a la sociedad. Por lo que, el presente trabajo contribuirá a mejorar los recursos naturales de la zona, lo cual se convertirá en una fortaleza para el desarrollo de los habitantes de la zona, lo que se espera que derive en una mejoría en su calidad de vida.

2.6. RECOMENDACIONES

Una vez que se han identificado las áreas con prioridad de restauración, el siguiente paso es realizar un diagnóstico especializado del área en donde se registren aspectos tales como el estado de alteración o perturbación, el potencial tanto biológico como físico de restauración, el potencial social, las condicionantes y el régimen de disturbio antrópico y/o natural.

Un programa de restauración ecológica tiene éxito siempre y cuando éste sea aceptado por todas las personas, desde los tomadores de decisiones, agricultores, campesinos, técnicos y toda aquella persona que tenga un interés en su desarrollo. Por lo que, el presente estudio tiene como propósito, que los escasos recursos existentes en el gobierno federal y municipal, destinados para acciones de restauración y conservación forestal se enfoquen en las áreas que realmente requieran atención, haciendo más eficientes los recursos asignados.

Otro punto importante, es que se contribuye en la planificación y calendarización de las áreas que requieren ser restauradas ecológicamente, esto con la finalidad de recuperar los bienes y servicios que proporcionan los ecosistemas, lo que al mismo tiempo se verá reflejado en una mejora en las condiciones de vida de los habitantes de la zona y de la población en general.

Capítulo III. IDENTIFICACIÓN DE LOS SITIOS DE REFERENCIA POTENCIALES, MEDIANTE TELEDETECCIÓN

3.1. INTRODUCCIÓN

Una de las primeras acciones a realizar en los proyectos de restauración, es identificar el ecosistema que servirá de referencia para guiar el proceso de restauración (SER, 2004). Se reconoce como el ecosistema de referencia un sitio existente lo más similar al ecosistema original del sitio a restaurar; del cual se debe tener su descripción lo más detallada posible. Una descripción más detallada del concepto se describe en el punto 1.3.3. Sitios de Referencia.

La identificación de una condición de referencia adecuada ha planteado siempre un desafío en la restauración ecológica; incluso la tarea se vuelve aún más difícil en los entornos con diversas historias de uso de suelo. Para lograr la identificación de estos sitios, existen una variedad de métodos y técnicas. Una de las técnicas empleadas actualmente en la conservación y manejo de las áreas boscosas, es mediante imágenes de satélite. No hay duda de que las técnicas de teledetección vía satélite han revolucionado la cartografía, evaluación y vigilancia de los bosques, lo que permite cálculos precisos de los bosques (extensión, condiciones, etc.) en una variedad de escalas, desde lo local a lo global (Newton, 2007).

La caracterización de los bosques de referencia debe tomar todos los componentes del ecosistema en cuenta, incluyendo organismos, estructuras, ciclos biogeoquímicos y factores abióticos en escalas temporales y espaciales, con la finalidad de asegurar que todos los factores que influyen en la conservación del ecosistema sean considerados y puedan ser replicados en el proceso de restauración ecológica (Moore *et al.* 1999). Para cumplir con los objetivos del capítulo, se utilizaron imágenes de satélite en la identificación de los sitios que podrían servir como referencia en futuros proyectos de restauración en la zona de estudio. Primero se realizó una clasificación supervisada a la imagen del área de

estudio y después se eliminaron todas aquellas áreas en donde existe algún tipo de manejo o agente de disturbio.

3.2. OBJETIVOS

- Identificar las áreas con cobertura vegetal que presenten el mayor grado de conservación para ser utilizados como sitios de referencia potenciales en futuros trabajos de restauración
- Elaborar el mapa correspondiente de las áreas identificadas como los sitios de referencia potenciales

3.3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.3.1. Correcciones de las imágenes

Se utilizaron dos imágenes de satélite multiespectrales Landsat 5 TM, el path y row correspondiente a la zona de estudio son 25-46 y 26-46 respectivamente, las cuáles fueron tomadas en el mes de abril del 2011. Para favorecer la utilidad de las imágenes de satélite, éstas se sometieron a dos formas de procesamiento (Newton, 2007):

1. El **procesamiento radiométrico**, busca asegurar que los datos medidos representen con precisión las propiedades espectrales de las características del objetivo.

2. El **procesamiento geométrico**, relaciona las ubicaciones de los píxeles con coordenadas en la superficie de la Tierra de acuerdo a una proyección cartográfica elegida. En el caso de las imágenes utilizadas para el presente trabajo ya contaban con este procesamiento.

Como primer paso se realizó la corrección radiométrica de las imágenes. Este procesamiento elimina los efectos de los errores de sensores y/o factores

ambientales tales como la interferencia atmosférica, a menudo utilizando datos adicionales recogidos cuando se obtuvo la imagen. Otro objetivo del proceso es medir la respuesta espectral de cualquier objeto de la superficie terrestre en la imagen con una recepción ideal. Este procesamiento se realizó con el programa IDRISI Selva mediante el módulo Image Processing/Restoration/Radiance (Newton, 2007; Laurente, 2011).

Posteriormente a esto se realizó la corrección atmosférica, la cual es necesaria para generar las firmas espectrales, el objetivo es eliminar el efecto de la dispersión de la radiación electromagnética originada por los gases y partículas suspendidas en la atmósfera, así como la nubosidad. La corrección se realizó aplicando el método de Análisis de Componentes Principales en el programa IDRISI Selva (Chuvienco, 2008; Laurente, 2011).

La corrección del efecto topográfico o del relieve, fue el último procesamiento realizado a las imágenes. Este proceso se define como la diferencia en valores de radiancia de superficies inclinadas comparadas con superficies horizontales. Para realizar esta corrección se empleó un Modelo de Elevación Digital (30 m) y el programa IDRISI Selva, implementando el módulo de Iluminación (Eastman, 2012).

3.3.2. Clasificación digital de imágenes

Una vez que las imágenes se procesaron, se realizó la clasificación digital de las imágenes. Esto para generar mapas temáticos mediante categorización e interpretación de imágenes de sensores remotos. Es decir, que la imagen multibanda se convierte en otra del mismo tamaño con características originales, pero con la diferencia de que cada pixel se etiqueta e identifica una categoría asignada al pixel. La imagen pasa de una escala cuantitativa a una escala cualitativa. El objetivo clave de la clasificación, es relacionar las características espectrales de los píxeles individuales a las clases de interés, tales como diferentes tipos de masas forestales o comunidades (Chuvienco, 2008; Newton, 2007; Eastman,

2012). Existen dos métodos de clasificación, la clasificación no supervisada y la clasificación supervisada. En este caso se utilizó la clasificación supervisada.

Clasificación supervisada

Este método de clasificación parte de cierto conocimiento de la zona bajo estudio, lo que permite delimitar sobre la imagen áreas lo suficientemente representativas de cada una de las categorías que se establezcan. Las áreas son denominadas como “sitios de entrenamiento” que, proveen una descripción estadística de modo que se espera que ciertas coberturas del terreno aparezcan en la imagen. Después se utiliza un procedimiento denominado “clasificador”, para evaluar la probabilidad de que cada píxel pertenezca a una de las clases determinadas (Chuvienco, 2008; Eastman, 2012). El clasificador es algún tipo de método automatizado, en el que se utiliza un algoritmo para asignar un píxel individual o grupos de píxeles a una categoría adecuada (Newton, 2007).

La clasificación supervisada contiene dos momentos fundamentales, la definición digital de categorías o fase de entrenamiento y la asignación de los píxeles de la imagen a una de esas categorías (Gil *et al.*, 2003).

Sitios de entrenamiento

El objetivo de la fase de entrenamiento es seleccionar una cantidad de píxeles (muestra), que sean lo suficientemente representativos de cada una de las clases determinadas en el estudio (Gil *et al.*, 2003).

Para determinar los sitios de entrenamiento, se realizaron salidas de campo a la zona de estudio y se georreferenciaron 145 puntos de las zonas de interés (Figura 34). Sobre la imagen en la composición de falso color (Bandas 4,3 y 2), se digitalizaron polígonos de las áreas correspondientes a cada clase alrededor de los puntos tomados en campo (Figura 35). Las clases definidas en este estudio son

cuatro: bosque, zonas de uso agropecuario, cuerpos de agua y áreas desprovistas de vegetación (se incluyen las áreas urbanas).

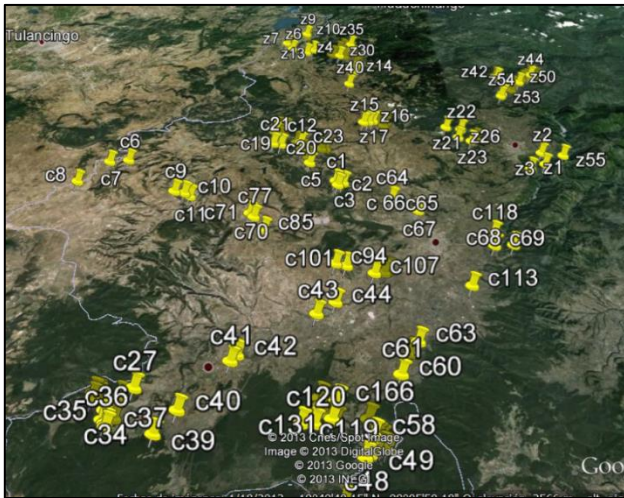


Figura 34. Localización de los puntos tomados para generar los sitios de entrenamiento en el área de estudio.

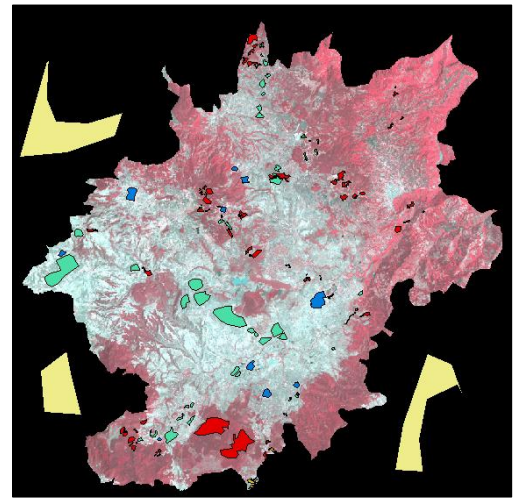


Figura 35. Digitalización de los sitios de entrenamiento sobre la imagen de falso color de la zona Chianahuapan-Zacatlán.

Firmas espectrales

Con los polígonos que se digitalizaron sobre la imagen, se generaron las firmas espectrales de los cuatro sitios de entrenamiento. Esto se realizó en el programa IDRISI Selva mediante el módulo Image processing/Signatura development/Makesig, se emplearon únicamente las bandas 1, 2, 3 y 4.

Clasificación de la imagen

Para realizar la clasificación propiamente dicha, se utilizó un clasificador duro. Las clasificaciones "duras" son adecuadas cuando los datos de la firma se obtienen de sitios de entrenamiento que sean homogéneos, y donde los píxeles con clases de cobertura de suelos mixtos son poco frecuentes (Newton, 2007).

El clasificador duro utilizado fue el denominado Fisher (Discriminación lineal), este se ejecutó en el programa IDRISI Selva, mediante el módulo Image processing/Hard classifiers/Fisher (LDA). Para eliminar los píxeles aislados y generalizar la imagen

clasificada, se aplicó un filtro de modo, mediante el módulo GIS Analysis/Context operators/Filter. La función del filtro de modo, se utilizó para reemplazar cada pixel por la clase de mayor ocurrencia dentro de una ventana de 3x3 alrededor de cada pixel (Eastman, 2012).

3.3.3. Validación de la clasificación (Matriz de confusión)

Para conocer la calidad del proceso de clasificación de la imagen, se construyó una “matriz de confusión”. Se le llama así, porque recoge los conflictos que se presentan entre las categorías (Gil *et al.*, 2003).

En la matriz las columnas indican las clases de referencia, y en las filas las clases derivadas por la clasificación. La diagonal de la matriz expresa el número de puntos clasificados donde se produce un total acuerdo entre la imagen y la realidad, mientras que los marginales suponen errores de asignación. La relación entre el número de puntos correctamente asignados y el total expresa la fiabilidad global (Figura 36) de la imagen clasificada (Chuvienco, 2008).

$$\hat{F} = \frac{\sum_{i=1,n} x_{ii}}{\sum_{i=1,n} \sum_{j=1,n} x_{ij}}$$

Figura 36. Ecuación de la fiabilidad global de la clasificación.

En donde, X_{ij} es el marginal de cada categoría i y X_{ij} es el Total.

De la matriz de confusión no sólo se conoce la cantidad de puntos que nuestra clasificación asignó correctamente, sino también la fiabilidad para cada una de las clases y las principales confusiones entre ellas (Gil *et al.*, 2003). Este proceso se realizó en el programa IDRISI Selva mediante el comando GIS analysis/Decision support/ERRMAT.

3.3.4. Índice Kappa

El estadístico Kappa se utilizó para evaluar si la clasificación ha discriminado las categorías de interés con precisión significativamente mayor a la que se hubiera obtenido con una asignación aleatoria (Chuvienco, 2008). Es una medida de la exactitud de la clasificación y su varianza es usada, en la comunidad de teledetección, para realizar pruebas estadísticas de diferencias significativas (Gil *et al.*, 2003).

Este índice se obtuvo a partir de la siguiente ecuación:

$$\hat{K} = \frac{n \sum_{i=1,n} x_{ii} - \sum_{i=i,n} x_{i+} x_{+i}}{n^2 - \sum_{i=i,n} x_{i+} x_{+i}}$$

En donde n es el tamaño de la muestra, X_{ij} el acuerdo observado, y el producto de los marginales (X_{i+} , X_{+i}) el acuerdo esperado en cada categoría i . El valor de coeficiente varía de 0 a 1, entre más cercano a 1, quiere decir que la concordancia de los dos métodos es muy alta.

3.3.5. Verificación de campo

Para realizar la verificación en campo se llevó a cabo un diseño aleatorio simple. De acuerdo con Chuvienco (2008), el tamaño mínimo de muestra es de 50 píxeles por clase temática. En el estudio, se tomaron 110 puntos de muestreo, aproximadamente 27 por clase temática, y en cada sitio se abarcó una superficie aproximada de 8,000 m².

3.3.6. Identificación de los sitios de referencia potenciales

Con la imagen clasificada se crearon mapas booleanos de cada una de las categorías. De los mapas resultantes se utilizó únicamente el mapa correspondiente a la categoría Bosque (Figura 37).

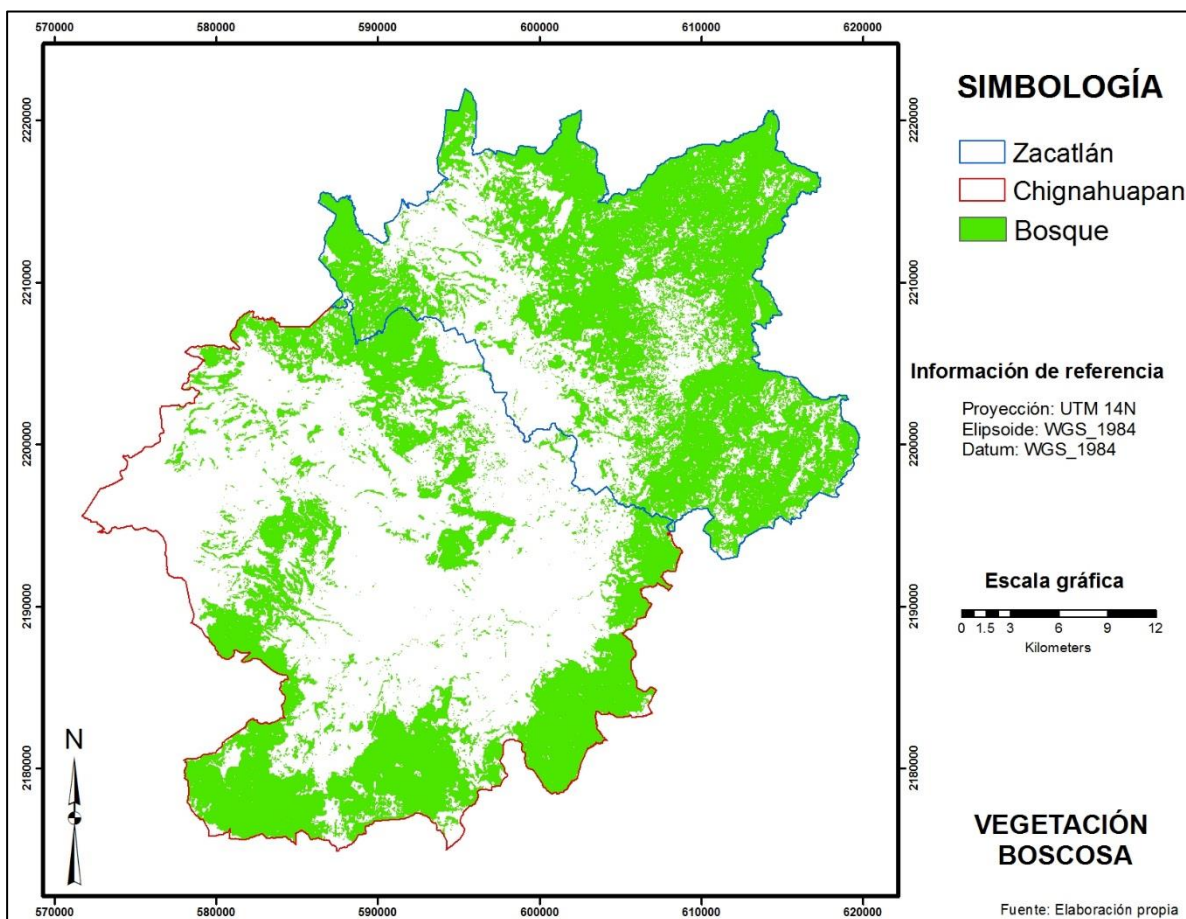


Figura 37. Superficie con presencia de vegetación boscosa en los municipios de Chignahuapan y Zacatlán.

Debido a que el objetivo es dejar las áreas con menor perturbación posible, del mapa de bosque se eliminaron las áreas que han sufrido algún tipo de perturbación o disturbio. Debido a lo anterior, se eliminaron las áreas bajo algún tipo de aprovechamiento y aquellas áreas en donde se han realizado trabajos de conservación de suelos y restauración. El procedimiento se realizó mediante álgebra de mapas.

La información de las áreas bajo manejo y demás actividades, se obtuvieron de las áreas designadas como prioritarias por la CONAFOR (Comisión Nacional Forestal) en las categorías de: manejo forestal maderable y no maderable, áreas prioritarias para reforestación, áreas prioritarias para plantaciones forestales comerciales y áreas prioritarias para conservación de suelos, de los años 2010, 2011 y 2012; cabe indicar que se eliminaron las áreas urbanas y los polígonos en donde se encuentra concentrada la población en las comunidades y ejidos.

3.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.4.1. Clasificación de la imagen

De la clasificación supervisada, se obtuvo que la superficie correspondiente a la categoría de bosque es de 57,907 ha aproximadamente ocupando el 46.3% del área total, las áreas que se encuentran con uso agrícola y pecuario representan el 42% del territorio, correspondiente a 52,520 ha. Con respecto a las áreas clasificadas como sin vegetación, se refiere a las áreas sin vegetación aparente y las áreas con uso urbano, éstas ocupan 14,319 ha correspondientes al 11.5% del área de estudio y los cuerpos de agua ocupan el 0.2% de la superficie con 210 ha aproximadamente (Figura 38).

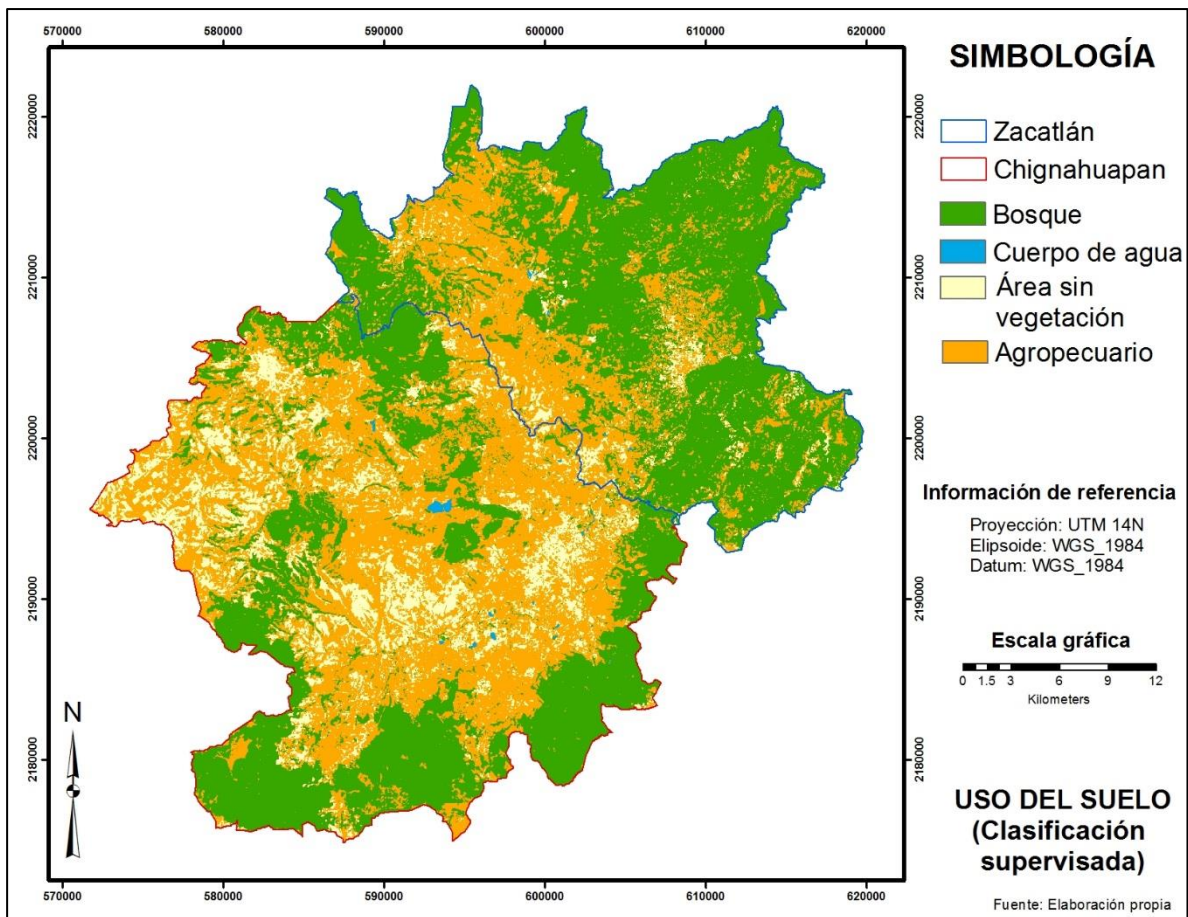


Figura 38. Clasificación supervisada del área de estudio (Chignahuapan-Zacatlán).

3.4.2. Validación de la clasificación

Con los datos obtenidos en la verificación de campo se construyó la matriz de confusión (Cuadro 18), la cual resultó con una exactitud global del proceso de clasificación de 79%. La exactitud se considera aceptable para imágenes de este tipo de acuerdo con lo estipulado por Chuvieco (2008). La exactitud del productor es de 80% en promedio global, lo que significa que ocho de cada diez áreas que presentan realmente esa cubierta están incluidos en la clasificación como tal. La exactitud del productor es desde el punto de vista de quien produce la clasificación. En el caso de la exactitud del usuario, es decir, desde el punto de vista de la persona que utiliza la clasificación, se tiene el 78.9% en promedio global, lo que indica que ocho de cada diez zonas clasificadas como esa cubierta realmente lo son.

Cuadro 18. Matriz de confusión resultante de la clasificación

		Datos de referencia (terreno)					Total	Exactitud Usuario	Error Comisión
		Clases*	1	2	3	4			
Datos de Clasificación	1	43	0	1	7	51	84.3	16	
	2	0	4	0	0	4	100	0	
	3	0	0	8	8	16	50	50	
	4	2	0	5	31	38	81.6	18	
	Total	45	4	14	46	109			
Exactitud productor		95.6	100	57.1	67.4				
Error Omisión		4	0.00	43	33				

Exactitud global = 79

Índice Kappa = 0.67

Fuente: Elaboración propia

*Los números del 1 al 4 hacen referencia a las categorías de clasificación: 1. Bosque; 2. Cuerpo de agua; 3. Áreas sin vegetación aparente y 4. Áreas de uso agropecuario.

En el caso particular de la categoría Bosque, que es el objetivo de esta investigación, se tienen valores altos en la confiabilidad tanto del productor (95.6%) como del usuario (84.3%). Lo que indica que la cobertura de bosque se ha clasificado de manera correcta y se disminuye en gran medida el error.

La estimación de estos errores es una parte esencial del control de calidad y deben formar parte de cualquier proyecto de mapeo. La precisión puede ser influenciada por las características del área que está siendo asignada, en la calidad de los datos utilizados para realizar la clasificación, y el método de clasificación utilizado. Cabe señalar que estimaciones de precisión de 80% o menos son comunes en este tipo de trabajos (Newton, 2007).

3.4.3. Índice Kappa

Con respecto al Índice Kappa, se obtuvo un valor de 0.67, el cuál de acuerdo con Landis y Koch (1977) es considerado como bueno, esto conforme a las seis categorías que propusieron para valorar el grado de acuerdo en función de este índice (Cuadro 19). Basándose en estas categorías se puede rechazar o aceptar la clasificación. En este caso la clasificación es considerada como aceptable.

Cuadro 19. Categoría de concordancias de validación para el coeficiente Kappa

KAPPA	GRADO DE ACUERDO
< 0	sin acuerdo
0 - 0,2	insignificante
0,2 - 0,4	bajo
0,4 - 0,6	moderado
0,6 - 0,8	bueno
0,8 - 1	muy bueno

3.4.4. Sitios de Referencia potenciales

Una vez eliminadas las áreas con algún tipo de perturbación o disturbio, las áreas restantes son aquellas áreas que, presumiblemente, tienen menor grado de perturbación y que podrían fungir como potenciales sitios de referencia (Figura 39)

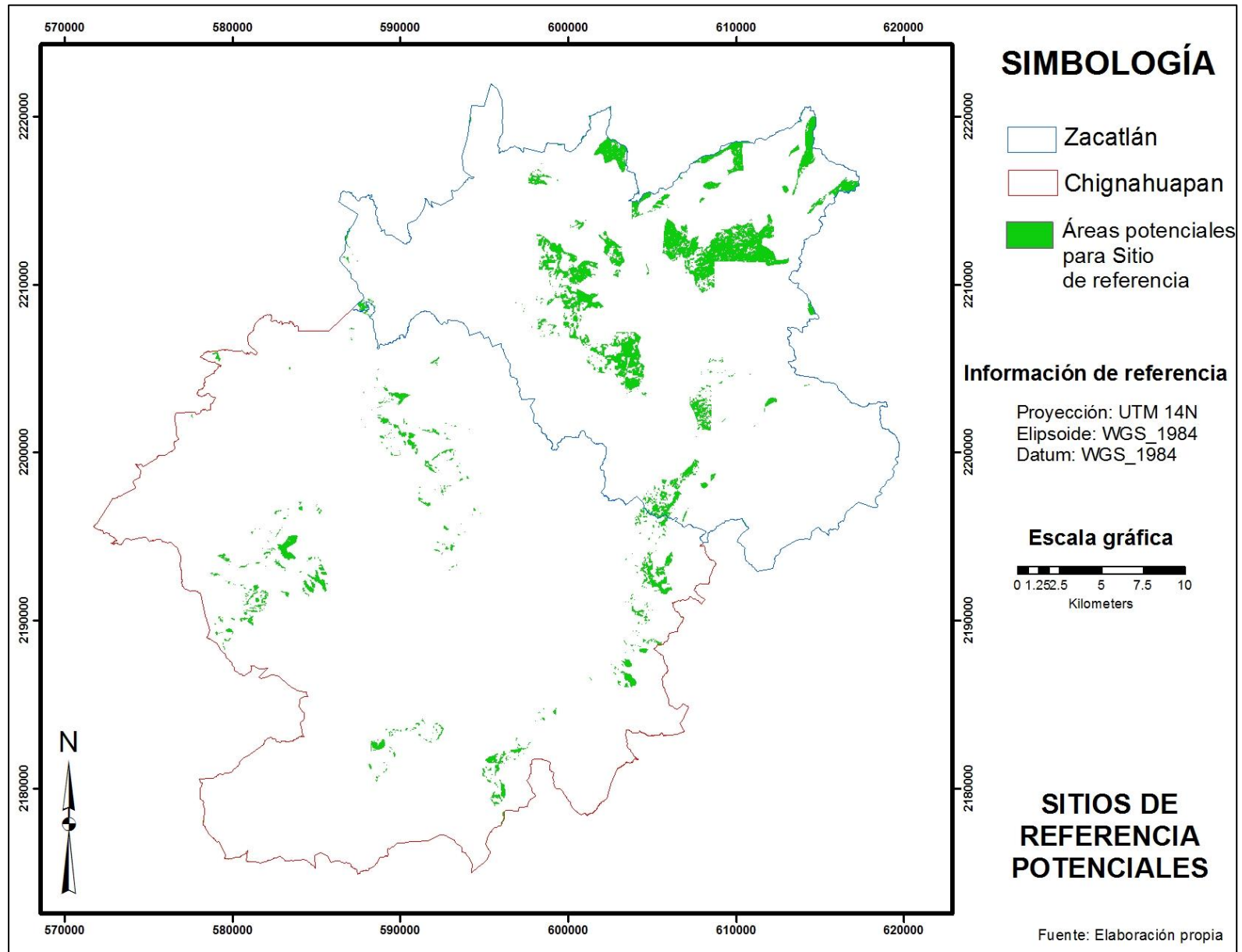


Figura 39. Áreas con potencial para ser tomadas como sitios de referencia en la región Chignahuapan-Zacatlán.

Se estimaron aproximadamente 4,753 hectáreas como zonas con potencial para fungir como sitios de referencia en el área de estudio, de las cuáles 3,637 ha corresponden al municipio Zacatlán y 1,115 ha al municipio de Chignahuapan (Figura 40).

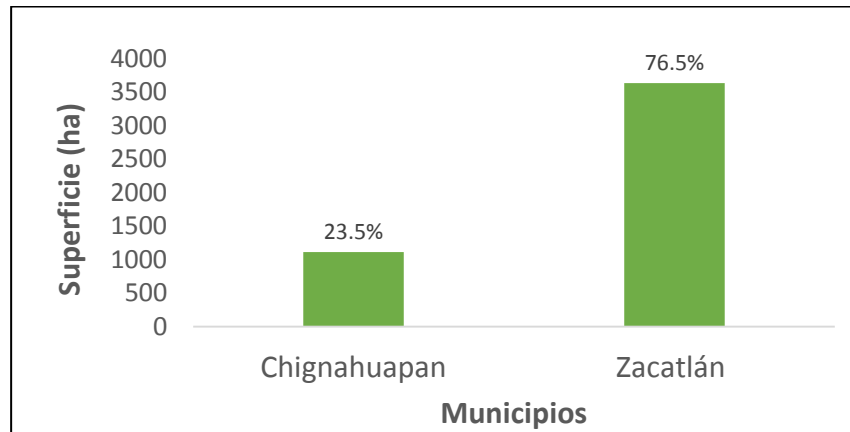


Figura 40. Superficie de los sitios de referencia en los municipios de estudio

La SER (2004) sugiere, idealmente, que el ecosistema de referencia se construya a partir de la información de múltiples sitios vecinos (que compartan condiciones ambientales semejantes al sitio que se desea restaurar). Por lo tanto, el mapa de áreas con potencial para ser tomadas como sitios de referencia, será de utilidad al momento de definir las características y las metas a seguir en las áreas a ser restauradas. Así mismo, el mapa de sitios de referencia potenciales se puede sobreponer con el mapa de áreas prioritarias para restauración ecológica, para ubicar las posibles áreas que servirán como referencia más cercanas al sitio de restauración.

En todos los trabajos relacionados con la restauración ecológica, se mencionan los sitios de referencia como una parte fundamental del trabajo, sin embargo no se explica cómo son identificados y definidos esos sitios. Por lo que, la técnica utilizada en este trabajo puede ser de utilidad para guiar la identificación de las áreas que servirán como referencia, sin olvidar que por ser un método de percepción remota, antes de tomar una decisión definitiva, se tendrá que ir a los sitios elegidos para comprobar si son los más adecuados.

Antonio y Treviño (2008), realizaron una investigación donde utilizaron el programa Arcview 3.2 y el módulo Model Buidel utilizando las variables pendiente, precipitación, uso del suelo, tipos de vegetación, patrones de cambio de uso y riesgo de degradación, así como la distancia al río y a las poblaciones. Los mapas se integraron con el software ERDAS imagine con la finalidad de favorecer la conservación de los fragmentos remanentes de vegetación, en las zonas de amortiguamiento del río y las laderas de la Sub-cuenca del río Pílon en el estado de Nuevo León. Aunque el objetivo del trabajo no era propiamente identificar sitios de referencia, esos remantes de vegetación son las áreas con menor degradación y por lo tanto, pueden tomarse como referencia de ser necesario.

Moore *et al.* (1999), investigaron las condiciones de referencia necesarias para llevar a cabo la restauración ecológica de *Pinus ponderosa* en el norte de Arizona. Para lograr su objetivo, determinaron las características principales de cuatro sitios, como son la estructura y función de los ecosistemas de *P. ponderosa*, los regímenes de perturbación en especialmente del fuego, los incendio se cuantificaron en la medida de cómo fue posible a través de estudios dendroecológicos y paleoecológicos, así como la evidencia histórica. De este estudio, se obtuvieron las líneas base para restaurar y reintroducir a *Pinus ponderosa* en las zonas donde pertenece originalmente. Sin embargo, a pesar de que en el estudio son descritas las características de los sitios de referencia, no se indica cómo fueron identificados y definidos las áreas que sirvieron como referencia.

3.5. CONCLUSIONES

De acuerdo con el estudio realizado, en la zona de estudio existen 4,753 hectáreas que podrían ser consideradas como sitios de referencia. El municipio de Zacatlán tiene la mayor superficie (76%) con zonas de estas características. En el caso del municipio de Chignahuapan, la superficie de referencia es de solo 1,115 ha, lo que podría representar un problema al momento de establecer las metas y objetivos de

un programa de restauración, esto debido a la escasa superficie que se tiene para tomar como referencia.

La identificación de los sitios de referencia es de gran importancia, dado que facilita las metas y objetivos de los proyectos de restauración que se pretendan llevar a cabo. Para definir las metas y objetivos, es necesario conocer las características y estructura del ecosistema de los sitios elegido como referencia, así como los procesos que se llevan a cabo dentro del mismo.

Con los sitios de referencia localizados, se pueden comenzar a realizar estudios acerca de la estructura, especies e interacciones de las especies que conforman los sitios identificados como los de menor perturbación. Es decir, se puede iniciar la caracterización de los sitios, para que llegado el momento se cuente con la información necesaria para elaborar un proyecto de restauración. De estos sitios, se puede derivar un número considerable de temas de investigación.

Las imágenes de satélite son una herramienta adecuada y de fácil adquisición para identificar las áreas con potencial para servir como referencia en proyectos de restauración, sin embargo las áreas seleccionadas tienen que ser inspeccionadas antes de ser elegidas definitivamente o implementar algún tratamiento. Durante la inspección se debe verificar o tomar información correspondiente a la evaluación inicial y se realizará el primer registro de indicadores que se incorporarán a la línea base y al sistema de monitoreo.

Cumplir o no el logro de los objetivos de un proyecto de restauración, depende de la elección del ecosistema de referencia por lo que lo ideal, es elegir uno que represente una etapa subsiguiente en la trayectoria sucesional, y no otro que se encuentre a décadas de distancia en cuanto a su desarrollo y complejidad (MAVDT, 2003).

4. LITERATURA CITADA

- Allison, K. S. 2004. What do we mean when we talk about ecological restoration?. *Ecological Restoration* 22:281-286.
- Antonio-Nemiga, X. y E. J. Treviño-Garza. 2008. Modelos espaciales aplicados al manejo de los recursos naturales: Una propuesta en la sub-cuenca del río Pílon, Nuevo León, México. *Ra Ximhai* 4:23-43.
- Aronson, J., D. Renison, J.O. Rangel-Ch., S. Levy-Tacher, C. Ovalle, A. del Pozo. 2007. Restauración del Capital Natural: sin reservas no hay bienes ni servicios. *Ecosistemas* 16(3):15-24.
- Avalos, F, S. y J. C. Baca C. 2007. Diagnóstico socio-económico y de manejo forestal. Unidad de Manejo Forestal-Zacatlán. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SMRN)-Asociación Regional de Silvicultores Chignahuapan-Zacatlán, A. C. 280 p.
- Barredo, C. J. I. 2005. Sistemas de Información geográfica y evaluación multicriterio, en la ordenación del territorio. 2º edición. RA-MA. Madrid, España. 279 p.
- Barrera-Cataño, J. I. y C. Valdés-López. 2007. Herramientas para abordar la restauración ecológica de áreas disturbadas en Colombia. *Universitas Scientiarum Revista de la Facultad de Ciencias* 12:11-24.
- Barrera-Cataño, J.I., S.M. Contreras-Rodríguez, N.V. Garzón-Yepes, A.C. Moreno-Cárdenas y S.P. Montoya-Villarreal. 2010. Manual para la Restauración Ecológica de los Ecosistemas Disturbados del Distrito Capital. Secretaría Distrital de Ambiente (SDA) y Pontificia Universidad Javeriana (PUJ). Bogotá, Colombia. 402 p.
- Barton, B. D. y L. Merino P. 2005. La experiencia de las comunidades forestales en México. Veinticinco años de silvicultura y construcción de empresas forestales comunitarias. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología y Consejo Civil Mexicano para la Silvicultura Sostenible A.C. D.F., México. 276 p.
- Bojórquez-Tapia, L.A., H. de la Cueva, S. Díaz, D. Malgarejo, G. Alcantar, M.J. Solares, G. Grobet y G. Cruz-Bello. 2004. Environmental conflicts and nature

reserves: redesigning Sierra San Pedro Mártir National Park, Mexico. *Biological Conservation* 117:111–126.

Bradshaw, A.D. 1996. Principios fundamentales de la restauración. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 53:3-9.

Censo de población y vivienda. 2010. Base de datos digital en línea. Disponible en <http://www.censo2010.org.mx/>. Consultado el 13 abril de 2013.

Centro Nacional de Desarrollo Municipal. 1999. Enciclopedia de los Municipios de México: Los Municipios de Puebla. Gobierno del Estado de Puebla. En línea. Disponible en <http://www.e-local.gob.mx/work/templates/enciclo/puebla/Mpios/21053a.htm>. Consultado el 13 abril de 2013.

Chávez, G., H. 2014. Áreas prioritarias mediante escenarios de deforestación y servicios ambientales en la Sierra Norte de Puebla. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillos, Edo. de México. 200 p.

Chuvieco, S. E. 2008. Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el Espacio. 3° ed. Ariel. Barcelona, España. 594 p.

Cipollini, K., A.L. Maruyama y C.L. Zimmerman. 2005. Planning for restoration: a decision analysis approach to prioritization. *Restoration Ecology* 13:460–470.

Clewell, A. F. y J. Aronson. 2007. *Ecological Restoration Principles, Values, and Structure of an Emerging Profession*. Society for Ecological Restoration International. Washington, D.C. 216 p.

Collados, B. C. 1999. Capital natural y calidad de vida: una perspectiva regional. *Ambiente y Desarrollo* XV(4):68-79.

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). 2011. *La Biodiversidad en Puebla: Estudio de Estado*. Editorial Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Gobierno del Estado de Puebla y Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. México. 408 p.

Consejo Canadiense de Parques (CCP). 2007. Principios y directrices para la restauración ecológica en las áreas protegidas naturales de Canadá.

Dirección General de Parques Nacionales y Agencia de Parques de Canadá. Gatineau, Quebec. 98 p.

Consejo Nacional de Población (CONAPO). 2011. Índice de marginación por entidad federativa y Municipio 2010. México, D. F. 54 p.

Costanza, R. R., R. de Groot, S. Farberk, M. Grasso, B. Hannon, K. Limburg, S. Naeem, R. V. O'Neill, J. Paruelo, R. G. Raskin, P. Suttonk y M. Van den Belt. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387:253-260.

Eastman, J. R., P.A. Kyem, J. Toledano y W. Jin. 1993. GIS and decision making. United Nations Institute for Training and Research (UMTAR). Ginebra. 9 p.

Eastman, R. J. 2012. IDRISI Selva. Guía para SIG y procesamiento de imágenes. Manual versión 17. Clark University. Argentina. 321 p.

Echeverría, C., I. Schiappacasse, R. Urrutia, M. Cárcamo, P. Becerra, C. Smith y M. Holmgren. 2010. Restauración de ecosistemas degradados para la conservación de la biodiversidad y el desarrollo rural en la zona semiárida de Chile central. Proyectos Reforlan-RUE 33. Valdivia. Chile. 24 p.

Elineema, R. R. 2002. Análisis del método AHP para la toma de decisiones multicriterio. Tesis de Maestría en Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. 96 p.

Fondo Mexicano para Conservación de la Naturaleza (FMCN). 2009. Análisis, priorización de alternativas y plan estratégico para mejorar la competitividad del manejo del agua, conservación de la biodiversidad y los recursos forestales de los bosques templados en México. Informe final. United States Agency for International Development. México. 165 p.

Gálvez, J. 2002. La Restauración Ecológica: Conceptos y Aplicaciones. Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente. Guatemala, Guatemala. 23 p.

Gayoso, J. y D. Alarcón. 1999. Guía de conservación de suelos forestales. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 91 p.

Geneletti, D. 2004. A GIS-based decision support system to identify nature conservation priorities in an alpine valley. *Land Use Policy* 21:149–160.

- Geneletti D., F. Orsi, E. Lanni y A.C. Newton. 2011. Identificación de Áreas Prioritarias para la Restauración de bosques secos. In: Newton, A.C. y N. Tejedor, eds. Principios y práctica de la restauración del paisaje forestal: Estudios de caso en las zonas secas de América Latina. Gland, Suiza: UICN y Madrid, España pp. 290-327.
- Gil, J. L., E. B. García, D. R. Ponvert-Delisle, R. Sánchez, M. B. Vega. 2003. Enfoques para la clasificación digital de imágenes mono y multiespectrales y su implementación en el software cubano TN Estudio V2.0. Revista de Teledetección 20:35-52.
- Gilabert, M. A., J. González-Piqueras y J. García-Haro. 1997. Acerca de los índices de vegetación. Revista de Teledetección 8:1-10.
- Gómez-Baggethun, E. y R. de Groot. 2007. Capital natural y funciones de los ecosistemas: explorando las bases ecológicas de la economía. Ecosistemas 16 (3):4-14.
- González, J.A., C. Montes, I. Santos y C. Monedero. 2008. Invirtiendo en capital natural: un marco para integrar la sostenibilidad ambiental en las políticas de cooperación. Ecosistemas 17(2):52-69.
- Guzmán, P., R. 2000. Sistemas de Información Geográfica. In: Maestría tecnológica en medidas sanitarias y fitosanitarias. Modulo I, Principios de salud animal y fitosanidad. J. Cibrián T. y S. Anaya R. (Comp.). Colegio de Postgraduados. México. 292–309 pp.
- Harris, A. J., R. J. Hobbs, E. Higgs y J. Aronson. 2006. Ecological restoration and global climate change. Restoration Ecology 14:170-176.
- Herrick, J. y B. Bestelmeyer. 2011. Planeación de uso de la tierra para limitar los impactos de la sequía y promover la recuperación. Foro Internacional EEUU-Mexico: Mitigación de la sequía y sistemas de alerta temprana. Zacatecas, México.
- Hobbs, J. R. y V. A. Cramer. 2008. Restoration Ecology: Interventionist approaches for restoring and maintaining ecosystem function in the face of rapid environmental change. Annual Review of Environment and Resources 33:39-61.

Hong, J. y J. R. Eastman. 2000. Application of fuzzy measures in multi-criteria evaluation in GIS. *International Journal of Geographical Information Science* 14:173-184.

INEGI. 1998. Diccionario de datos Edafológicos. Escala 1:250,000 (vectorial). Documento en línea. [http://www.google.com.mx/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&frm=1&source=web&cd=1&ved=0CCYQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.inegi.org.mx%2Fgeo%2Fcontenidos%2Frecnat%2Fedafologia%2F%3F_file%3D%2Fgeo%2Fcontenidos%2Frecnat%2Fedafologia%2Fdoc%2Fdd_edafologicos\(alf\)_250k.pdf&ei=c3zoUpuUJMPt2QX8g4GYAQ&usg=AFQjCNHnBZT6_rZNMBdn2NlalFxLazj3UA](http://www.google.com.mx/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&frm=1&source=web&cd=1&ved=0CCYQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.inegi.org.mx%2Fgeo%2Fcontenidos%2Frecnat%2Fedafologia%2F%3F_file%3D%2Fgeo%2Fcontenidos%2Frecnat%2Fedafologia%2Fdoc%2Fdd_edafologicos(alf)_250k.pdf&ei=c3zoUpuUJMPt2QX8g4GYAQ&usg=AFQjCNHnBZT6_rZNMBdn2NlalFxLazj3UA) Consultado en abril de 2013.

Instituto Nacional de Ecología (INE) 2005. Temas sobre restauración ecológica. Ó. Sánchez, E. Peters, R. Márquez-Huitzil, E. Vega, G. Portales, M. Valdez y D. Azuara Eds. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, U.S. Fish & Wildlife Service y Unidos para la Conservación. México, D.F. 256 p.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 1997. Diccionario de datos de uso del suelo y vegetación, escala 1:250 000. Documento en línea en http://www.semarnat.gob.mx/temas/ordenamientoecologico/Documents/documentos%20ordenamiento/usue_250.pdf. Consultado en abril de 2013.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2012. El recurso tierra en las unidades de producción. Censo Agropecuario 2007. Universidad de Guadalajara. México. Documento en línea en http://www.inegi.org.mx/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/censos/agropecuario/2007/agricola/recurs_tierra/mtudg_ineg07.pdf. Consultado en abril de 2013.

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). 2005. El manejo de Bosques Templados en Puebla. Criterios e Indicadores para evaluar la sustentabilidad. Libro Técnico No.1. CENID-COMEF. México, D.F. 262 p.

IUSS Grupo de Trabajo WRB. 2007. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Primera actualización 2007. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. FAO, Roma. Documento en línea en <http://www.fao.org/docrep/011/a0510s/a0510s00.HTM>. Consultado en abril de 2013.

- Jankowski, P. 1995. Integrating geographical information systems and multiple criteria decision-making methods. *International Journal of Geographical Information Systems* 9(3):251-273.
- Jiménez, S., J. E. 2004. Los factores críticos de éxito en la cadena de suministro. *Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Publicación Técnica No. 237. Querétaro, México. 189 p.*
- Landeta, J. 1999. El método Delphi, una técnica de previsión del futuro. *Ariel. Barcelona. 103 p.*
- Landis, J. R. y G. G. Koch. 1977. The measurement of observer Agreement for categorical data. *Biometrics* 33:159–174.
- Laurente, C., M. A. 2011. Medición de la deforestación mediante percepción remota en la microcuenca río Supte, Tingo María, Perú. *GeoFocus* 11:1-15.
- Malczewski, J. 1999. GIS and multicriteria decision analysis. *John Wiley. Inc. Ontario, Canadá. 392 p.*
- Marjokorpi, A. y R. Otsamo. 2006. Prioritization of target areas for rehabilitation: A case study from West Kalimantan, Indonesia. *Restoration Ecology* 14: 662–673.
- Martínez-Romero, E. 1996. La restauración ecológica. *Ciencias* 43:56-61.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT). 2003. Restauración de Ecosistemas a partir del manejo de la vegetación. Guía metodológica. Bogotá D. C., Colombia. 96 p.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT). 2007. Protocolo de Restauración de Coberturas Vegetales Afectadas por Incendios. Bogotá D. C., Colombia. 63 p.
- Moore, M. M., W. W. Covington, y P. Z. Fule. 1999. Reference conditions and ecological restoration: a southwestern Ponderosa Pine perspective. *Ecological Applications* 9(4):1266-1277.

- Morales B., J. A. y G. J. Castaño V. 2006. Consideraciones éticas en torno a la valoración económica como estrategia para la conservación de la diversidad biológica. *Boletín Científico Museo de Historia Natural* 10:103-115.
- Newton, A. C. 2007. *Forest Ecology and Conservation. A Handbook of Techniques*. Oxford University Press. New York. 454 p.
- Olivas, G., U. E., J. R. Valdez L., A. Aldrete, M. J. González G. y G. Vera C. 2007. Áreas con aptitud para establecer plantaciones de maguey cenizo: definición mediante análisis multicriterio y SIG. *Revista Fitotecnia Mexicana* 30:411–419.
- Ortega, M., F. 2008. El método Delphi, prospectiva en Ciencias Sociales a través del análisis de un caso práctico. *Revista-Escuela de Administración de Negocios* 64:31-54.
- Posner, J., C. Bussink, R. J. Hijmans, R. Delgado, H. Willet, P. Zorogastúa y J. De la Cruz. 2003. Priorizando Áreas para la Conservación de Suelos en la microcuenca La Encañada. *Contribuciones para el Desarrollo Sostenible de los Andes No. 2*. Lima, Perú. 30 p.
- Prontuario de Información Geográfica Municipal de los Estados Unidos Mexicanos, Puebla (PIGMEUM). 2009. Clave geoestadística 21053 y 21208. Documento en línea en <http://mapserver.inegi.org.mx/dsist/prontuario/index2.cfm>. Consultado en abril de 2013.
- Puerta, T. R., J. Rengifo T. y N. Bravo M. 2011. *ArcGis básico 10*. Editorial Facultad de Recursos Naturales Renovables. Universidad Nacional Agraria de la Selva. Perú. 148 p.
- Rojas, L., O. 2011. Análisis comparativo de costos del uso de la tierra en la Sierra norte de Puebla. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Texcoco, Edo. México. 135 p.
- Sarukhán, J., P. Koleff, J. Carabias, J. Soberón, R. Dirzo, J. Llorente B., G. Halffter, R. González, I. March, A. Mohar, S. Anta y J. de la Mazza. 2009. *Capital natural de México. Síntesis: conocimiento actual, evaluación y perspectivas de sustentabilidad*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México. 100 p.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2006. *Manual para el Proceso de Ordenamiento Ecológico*. México, D.F. 335 p.

- Sistema Nacional de Información Forestal (SNIF). Reportes de incendios forestales. Documento en línea en <http://www.cnf.gob.mx:8080/snif/portal/> Consultado en abril de 2013.
- Society for Ecological Restoration International (SER). 2004. Principios de SER International sobre la restauración ecológica. Tucson, Arizona. 15 p.
- Society for Ecological Restoration International (SER). 2009. Foundations of Restoration Ecology. Falk, A. D., M. A. Palmer y J. B. Zedler (Eds.). Tucson, Arizona. 364 p.

IV. ANEXOS

ANEXO 1. Información de organismos dedicados a la Restauración Forestal (Newton, 2007):

- **Forest Restoration Information Service (FRIS), www.unep-wcmc.org/forest/restoration/:** Servicio de información desarrollado por el Centro Mundial de Vigilancia y de Monitoreo de la Conservación, en colaboración con una serie de socios. El sitio incluye una base de datos en línea de los proyectos de restauración forestal en todo el mundo, y una serie de herramientas para facilitar el establecimiento de prioridades, el diseño y la ejecución de los esfuerzos de restauración forestal.
- **Global Partnership on Forest Landscape Restoration, www.unep-wcmc.org/forest/restoration/globalpartnership/index.htm:** Es una red de gobiernos, organizaciones, comunidades y personas que trabajan en la restauración forestal a escala de paisaje (FLR). La asociación está diseñada para apoyar los esfuerzos internacionales en la restauración de los bosques para fomentar el intercambio de información y vinculando la política y la práctica.
- **IUCN Forest Conservation Programme, www.iucn.org/themes/fcp/experience_lessons/flr.htm:** El objetivo es unir a la gente para identificar, negociar y poner en marcha prácticas que optimicen los beneficios ambientales, sociales y económicos de los bosques y árboles dentro de un patrón más amplio de usos de la tierra. Esto se logra a través de proyectos sobre el terreno.
- **WWF's Forest for Life Programme, www.panda.org/forests/restoration/:** Posee una red mundial de más de 300 proyectos de conservación forestal en cerca de 90 países, entre ellos una cartera de programas de restauración del paisaje forestal realizado en colaboración con la UICN. Su objetivo es restaurar bosques en 20 paisajes de gran importancia dentro de las ecorregiones de prioridad 2020.

- **Society for Ecological Restoration International, www.ser.org/:**
Organización sin fines de lucro con más de 2000 miembros en todo el mundo, ampliamente reconocida como una fuente de conocimientos sobre ciencia de la restauración, la práctica y la política. A pesar de que no se involucra en proyectos de restauración directamente en sí, la Sociedad apoya el diálogo e intercambio de información a través de su página web y a través de publicación de revistas académicas como Ecología de la Restauración.

Anexo 2. Matrices de comparación pareada y valores para la estandarización de los criterios y subcriterios

CRITERIO SUELO

TEXTURA	S1	S2	S3	N1	N2	Valor
S1	1					1
S2	1/3	1				0.5809
S3	1/5	1/4	1			0.2884
N1	1/8	1/7	1/6	1		0.0738
N2	1/9	1/8	1/7	1	1	0.0682

EROSIÓN	S1	S2	S3	N1	N2	Valor
S1	1					1
S2	1/3	1				0.5036
S3	1/6	1/3	1			0.2904
N1	1/9	1/7	1/6	1		0.0665
N2	1/9	1/9	1/9	1	1	0.0605

PERMEABILIDAD	S1	S2	S3	N1	N2	Valor
S1	1					1
S2	1/2	1				0.5597
S3	1/5	1/2	1			0.3287
N1	1/8	1/6	1/4	1		0.1448
N2	1/9	1/8	1/7	1/6	1	0.0568

PROFUNDIDAD	S1	S2	S3	N1	N2	Valor
S1	1					1
S2	1/2	1				0.5245
S3	1/2	1	1			0.5245
N1	1/5	1/2	1/2	1		0.3067
N2	1/9	1/9	1/9	1/9	1	0.0624

HUMEDAD	S1	S2	S3	N1	N2	Valor
S1	1					1
S2	1/2	1				0.4827
S3	1/4	1/2	1			0.3501
N1	1/7	1/2	1/3	1		0.1993
N2	1/9	1/8	1/7	1/6	1	0.0592

CRITERIO TOPOGRAFÍA

PENDIENTE	S1	S2	S3	N1	N2	Valor
S1	1					1
S2	1/3	1				0.5071
S3	1/5	1/3	1			0.2623
N1	1/8	1/5	1/3	1		0.1420
N2	1/9	1/8	1/7	1/6	1	0.0530

CRITERIO COBERTURA VEGETAL

USO DEL SUELO	S1	S2	S3	N1	N2	Valor
S1	1					1
S2	1/5	1				0.4337
S3	1/2	1/2	1			0.3199
N1	1/7	1/4	1/2	1		0.1649
N2	1/9	1/8	1/7	1/6	1	0.0536

VEGETACIÓN SECUNDARIA	S1	S2	S3	N1	N2	Valor
S1	1					1
S2	1/3	1				0.5734
S3	1/5	1/4	1			0.2376
N1	1/8	1/6	1/3	1		0.1198
N2	1/9	1/9	1/6	1/4	1	0.0558

VEGETACIÓN DENSA	S1	S2	S3	N1	N2	Valor
S1	1					1
S2	1/2	1				0.3297
S3	1/2	1	1			0.3297
N1	1/4	3	3	1		0.5816
N2	1/9	1/5	1/5	1/4	1	0.0875

Anexo 3. Encuesta para la identificación de áreas prioritarias potenciales para la restauración ecológica

Estimado integrante del Panel de Expertos

El cuestionario Delphi que aquí presento es con la finalidad de definir la importancia de los criterios y subcriterios a utilizar en la investigación para la Identificación de Áreas prioritarias para Restauración Ecológica (activa) en los municipios de Chignahuapan y Zacatlán del estado de Puebla, México (Anexo).

El estudio Delphi es un sistema basado en una encuesta especializada que nos permitirá visualizar con un grado importante de factibilidad, que variable(s) ambientales son la(s) más importantes a tomar en cuenta para definir áreas prioritarias para la restauración ecológica.

Agradezco de antemano la dedicación requerida para responder el formulario, y aseguro la confidencialidad de sus respuestas en el procesamiento de los resultados.

Atentamente

María Luisa González Ovando

Estudiante de maestría del Postgrado Forestal

Colegio de Postgraduados. Montecillo

INSTRUCTIVO

Por favor, lea atentamente este instructivo antes de empezar a contestar el cuestionario.

ASPECTOS BÁSICOS DEL MÉTODO DELPHI

Un pronóstico Delphi consiste en someter a un grupo de expertos o especialistas al llenado sucesivo de dos o más formularios destinados a recolectar sus opiniones y visiones sobre el tema en cuestión. Cada instancia de llenado del formulario se denomina ronda. Uno de los objetivos básicos de un proceso Delphi consiste en el logro de pronósticos que sean el producto de consensos lo más sólidos posibles.

La vía para alcanzar este consenso supone que, en las rondas posteriores a la primera, cada experto que ha realizado pronósticos que se desvían en algún grado de los pronósticos más consensuados tenga la posibilidad de modificar su respuesta. Para ello se le presentan los resultados de la pregunta específica en que ha existido tal desviación, y se le propone que la reconsidere si encuentra argumentos razonables para ello. De lo contrario, debe ratificar su respuesta anterior.

Este cuestionario se estructurará en base a dos rondas; es decir, habrá dos instancias de circulación y respuesta de los formularios. El cuestionario consiste de 3 secciones; en la primera se define la importancia relativa de los criterios y subcriterios mediante una técnica donde todos los criterios identificados son comparados uno con otro en una matriz de comparación por pares; en la

segunda sección se trata de homogeneizar los valores de los subcriterios en una escala común y en la tercera parte se solicitan algunos datos básicos de los expertos.

La comparación por pares es una medida que expresa la preferencia relativa entre criterios, generando una escala y atribuyendo valores numéricos a juicios subjetivos. Saaty en 1980 generó una escala para la comparación que consta de valores que van del 1 al 9 para describir la intensidad de la importancia de un criterio sobre otro.

¿Cómo responder las preguntas?

Las preguntas se contestan eligiendo un valor de la siguiente escala diseñada por Saaty (1980).

Intensidad de importancia	Definición	Explicación
1	Igual importancia	Las dos actividades contribuyen de igual manera al objetivo
3	Importancia moderada	La experiencia y el juicio moderadamente a favor de una actividad sobre la otra.
5	Importancia fuerte	La experiencia y el juicio fuertemente a favor de una actividad sobre la otra
7	Importancia muy fuerte o importancia demostrada	Una actividad es fuertemente favorecida sobre la otra.
9	Extrema importancia	La evidencia favorece una actividad sobre la otra es del orden de afirmación más alto posible.
2,4,6,8	Valores intermedios entre los valores de escala	Cuando es necesario un término medio

Recomendaciones sobre la actitud de respuesta

No está de más hacer algunas recomendaciones sobre cuál sería la mejor actitud a la hora de enfrentarse al cuestionario, recomendaciones que, de seguirse, asegurarían información homogénea y de buena calidad.

Deberá responderse en forma espontánea pero razonada.

“En forma espontánea” quiere decir que se hará uso del conocimiento que ha acumulado a lo largo de su actividad en el tema, sin que sea necesario consultar fuentes externas como artículos, estadísticas o cualquier material similar. Si desea hacerlo, puede hacerlo sin problemas; pero, en principio, basta con “hacer funcionar” el conocimiento ya disponible.

“En forma razonada” quiere decir que se pide un mínimo de reflexión, atención y dedicación para cada pregunta. Si ello no se tuviese en cuenta, la consecuencia obvia será un pronóstico de menor calidad.

Confidencialidad

La totalidad de la información es absolutamente confidencial. Eso significa que no se difundirá en ámbitos públicos o privados las respuestas individualizadas de cada uno de los expertos.

IMPORTANCIA DE CRITERIOS Y SUBCRITERIOS

El objetivo de esta sección es determinar la importancia de los criterios y subcriterios, realizando comparaciones entre pares de criterios y subcriterios según sea el caso.

En este caso debe tomar un elemento de la Fila de criterios para determinar su importancia con respecto a cada elemento de las Columnas de criterios escribiendo en la celda de intersección el valor de importancia relativa que representa el criterio indicado en la Fila con respecto al criterio indicado en la Columna; el valor será tomado de la escala Saaty (Cuadro 1). En caso de que el criterio indicado en la columna sea de mayor importancia que el indicado en la Fila, la forma de representarlo será anteponiendo "1/" al valor de importancia que usted determine.

Nota: Las celdas con valor 1 o X no se llenan debido a que el valor 1 indica que se está comparando la misma condición y las celdas con valor X quedan determinadas cuando se establecen el valor en las celdas que están en blanco.

Cuadro 1. Escala Saaty

1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9
Extrema	Fuerte		Moderada	Igual	Moderada	Fuerte		Extrema
Menos importante				Más importante				

Nota: De ser necesario utilice valores intermedios sugeridos por la escala de medición

EJEMPLO

En el Cuadro 2 se muestra un ejemplo simple de una matriz de comparación, donde 3 criterios son comparados uno con otro. En la comparación directa de los criterios C2 y C1, en este ejemplo, el criterio C2 ha sido considerado fuertemente más importante que C1, por lo que el valor "5" ha sido asignado a la posición correspondiente en la matriz. En caso contrario, si se hubiese considerado el criterio C1 fuertemente menos importante que el criterio C2, el valor correspondiente en la posición de la matriz sería de "1/5".

Cuadro 2. Ejemplo de matriz de comparación por pares

		COLUMNAS		
		CRITERIOS	C1	C2
FILAS	C1	1	X	X
	C2	5	1	X
	C3	4	1/2	1

ENCUESTA

1. De los Criterios establecidos para identificar las áreas prioritarias a restaurar, indique en la matriz el grado de importancia de cada uno de ellos con respecto al otro de acuerdo a su conocimiento y experiencia, utilizando la escala de Saaty.

		COLUMNAS			
CRITERIOS		Clima	Suelo	Topografía	Cobertura Vegetal
FILAS	Clima	1	X	X	X
	Suelo		1	X	X
	Topografía			1	X
	Cobertura Vegetal				1

2. Dentro del criterio **Suelo** se tienen contemplados 5 subcriterios, indique en la matriz el grado de importancia de cada uno de ellos con respecto al otro de acuerdo a su conocimiento y experiencia. Utilizando la escala de Saaty.

		COLUMNAS				
SUBCRITERIOS		Textura	Profundidad	Permeabilidad	Erosión	Humedad
FILAS	Textura	1	X	X	X	X
	Profundidad		1	X	X	X
	Permeabilidad			1	X	X
	Erosión				1	X
	Humedad					1

3. Dentro del criterio **Cobertura Vegetal** se tienen contemplados 3 subcriterios, indique en la matriz el grado de importancia de cada uno de ellos con respecto al otro de acuerdo a su conocimiento y experiencia. Utilizando la escala de Saaty.

		COLUMNAS		
SUBCRITERIOS		Tipo de vegetación	Vegetación secundaria	Vegetación densa
FILAS	Tipo de vegetación	1	X	X
	Vegetación secundaria		1	X
	Vegetación densa			1

4. De la siguiente lista de variables marque cual (es) considera importante(s) incluir para identificar áreas que requieren ser restauradas y por favor justifique su respuesta.

<input type="checkbox"/>	Cuerpos de agua	_____
<input type="checkbox"/>	Corrientes de agua	_____
<input type="checkbox"/>	Temperatura media anual	_____
<input type="checkbox"/>	Densidad de población	_____
<input type="checkbox"/>	Evapotranspiración	_____
<input type="checkbox"/>	Otras:	_____

Sección III: PERFIL DEL EXPERTO

Nombre: _____

Edad: _____

Máximo nivel de educación: _____

Ocupación actual: _____

Correo electrónico: _____

Anexo 4. Expertos y/o especialista que colaboraron en la encuesta

NOMBRE	ÁREA DE TRABAJO/LUGAR DONDE LABORA
Amado Insfran Ortiz	Universidad Nacional de Asunción. Facultad de Ciencias Agrarias. Paraguay.
Carlos Ortiz Solorio	Colegio de Postgraduados. Montecillos. Edafología.
Dante Arturo Rodríguez Trejo	Universidad Autónoma Chapingo. División de Ciencias Forestales.
Eliane Ceccon	Universidad Nacional Autónoma de México. Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias, campus Morelos.
Elizabeth Hernández Acosta	Universidad Autónoma Chapingo. Recursos Naturales Renovables.
Fabiola López Barrera	Instituto Nacional de Ecología. Departamento de Ecología Funcional.
Jacinto Samuel García Carreón	Comisión Nacional Forestal. Subgerente de Protección, Manejo y Mejoramiento de Suelos Forestales
José Luis Oropeza	Colegio de Postgraduados. Montecillos. Hidrociencias.
José Ma. Rey Benayas	Universidad de Alcalá. Departamento de Ecología. España.
Karim Musalem Castillejos	Centro de Investigación del Chaco Americano en Paraguay.
Liliana Muñoz Gutiérrez	Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Programa de Investigación de Manejo Forestal Sustentable y Servicios Ambientales.
María del Consuelo Bonfil Sanders	Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ciencias. Departamento de Ecología y Recursos Naturales.
María Lidia Aranda Espinoza	Universidad Nacional de Asunción. Facultad de Ciencias Agrarias. Paraguay.
Mario González Espinosa	Colegio de la Frontera Sur en San Cristóbal de las Casas, Chiapas, México.
Mario Martínez Menes	Colegio de Postgraduados. Montecillos. Hidrociencias.
Neptali Ramírez Marcial	Colegio de la Frontera Sur en San Cristóbal de las Casas, Chiapas, México.
Néstor Gutiérrez Beltrán	Instituto de Investigaciones para el Desarrollo Forestal. Venezuela.
Noel Riaño Ramírez	Empresa "Ingeniería para el manejo, restauración y conservación de ecosistemas". México
Ricardo Sánchez Velázquez	Comisión Nacional Forestal.
Roberto Lindig Cisneros	Universidad Nacional Autónoma de México. Centro de Investigaciones en Ecosistemas, campus Morelia.
Vicente Arriaga Martínez	Comisión Nacional Forestal. Coordinador General de Conservación y Restauración.

Anexo 5. Pesos asignados por los expertos a cada criterio y subcriterio

CRITERIOS (W)					
Experto	Clima	Suelo	Topografía	Cobertura Vegetal	Consistencia
1	0.0507	0.2157	0.3196	0.4121	0.04
2	0.1309	0.2238	0.221	0.4242	0.07
3	0.0272	0.3605	0.2166	0.3959	0.04
4	0.038	0.2025	0.5266	0.2328	0.07
5	0.2693	0.2788	0.2337	0.2181	0.03
6	0.0464	0.261	0.2952	0.3973	0.06
7	0.0847	0.3106	0.2888	0.3158	0.1
8	0.058	0.4117	0.2191	0.311	0.06
9	0.0652	0.292	0.4219	0.221	0.07
10	0.0345	0.212	0.2764	0.4768	0.12
11	0.1151	0.2351	0.2993	0.3505	0.24
12	0.0467	0.2766	0.363	0.3136	0.14
13	0.1605	0.4624	0.2894	0.0877	0.109
14	0.3673	0.3007	0.2078	0.1239	0.9
PROMEDIO	0.0856	0.2888	0.2985	0.3058	
Máximo	0.2693	0.4624	0.5266	0.4768	
Mínimo	0.0272	0.2025	0.2078	0.0877	

*Los datos en color corresponden a las respuestas que resultaron consistentes

SUELO (W)						
Experto	Textura	Profundidad	Permeabilidad	Erosión	Humedad	Consistencia
1	0.1652	0.145	0.1231	0.4366	0.1301	0.04
2	0.1566	0.0667	0.1566	0.5596	0.0605	0.03
3	0.0854	0.1186	0.1599	0.567	0.0691	0.07
4	0.1007	0.3237	0.0539	0.4865	0.0351	0.09
5	0.226	0.0973	0.0973	0.4656	0.1137	0.06
6	0.0945	0.0641	0.0945	0.5418	0.2052	0.05
7	0.1658	0.1018	0.1376	0.3741	0.2207	0.1014
8	0.2499	0.2074	0.1115	0.3535	0.0778	0.04
9	0.2808	0.0505	0.2808	0.107	0.2808	0.01
10	0.0714	0.0714	0.0714	0.5984	0.1873	0.02
11	0.098	0.1452	0.1194	0.2395	0.3979	0.08
12	0.0811	0.175	0.1721	0.3967	0.175	0.03
13	0.0807	0.3083	0.0807	0.4034	0.1269	0.08
14	0.2324	0.3030	0.2324	0.1183	0.1139	0.54
PROMEDIO	0.1409	0.1478	0.1268	0.4296	0.1550	
Máximo	0.2808	0.3237	0.2808	0.5984	0.3979	
Mínimo	0.0714	0.0505	0.0539	0.1070	0.0351	

*Los datos en color corresponden a las respuestas que resultaron consistentes

COBERTURA VEGETAL				
Experto	Uso del Suelo	Vegetación secundaria	Vegetación densa	Consistencia
1	*	*	*	*
2	0.2352	0.3245	0.4403	0.72
3	0.6470	0.2766	0.0764	0.72
4	0.7854	0.0658	0.1488	0.07
5	0.2583	0.1047	0.637	0.03
6	*	*	*	*
7	0.5736	0.1399	0.2864	0.1183
8	0.2643	0.3286	0.4071	0.19
9	0.6491	0.0719	0.279	0.06
10	0.7143	0.1429	0.1429	0
11	0.1311	0.2081	0.6608	0.05
12	0.6483	0.2297	0.122	0
13	0.6584	0.2529	0.0887	0.3
14	0.7854	0.1488	0.0658	0.07
PROMEDIO	0.5674	0.1388	0.2938	
Máximo	0.7854	0.2297	0.6608	
Mínimo	0.1311	0.0658	0.0658	

* No se obtuvo respuesta

Los datos en color corresponden a las respuestas que resultaron consistentes