



Áreas prioritarias para restauración ecológica y sitios de referencia en la región Chignahuapan-Zacatlán

Priority areas for ecological restoration and reference sites in Chignahuapan-Zacatlan region

María Luisa González Ovando¹, F. Ofelia Plascencia Escalante*¹ y Tomás Martínez-Trinidad¹

¹ Colegio de Postgraduados, campus Montecillo. Postgrado en Ciencias Forestales.

* Autor de correspondencia: fplascen@colpos.mx

RESUMEN

La degradación de los recursos naturales genera la necesidad de recuperarlos mediante estrategias de restauración ecológica, para lo cual, es necesario identificar de manera sencilla las zonas a restaurar y priorizar las actividades a realizar. El objetivo de este trabajo fue utilizar la evaluación multicriterio para identificar las áreas prioritarias que necesitan ser restauradas en la región Chignahuapan-Zacatlán, Puebla; así como determinar mediante teledetección los sitios de referencia para las zonas identificadas para su restauración. Se utilizó el Proceso Analítico Jerarquizado en un entorno de sistemas de información geográfica para definir prioridades de atención. Para esto, se consideraron 12 criterios ambientales y se incorporó el conocimiento de 21 expertos en restauración ecológica a través de matrices de comparación pareada. Los sitios de referencia se determinaron mediante la clasificación supervisada de imágenes de satélite y la exclusión de las áreas con algún tipo de perturbación. Los resultados indican que cerca de 80% de la superficie se clasificó con algún nivel de prioridad a restauración. A pesar de esto, solamente 0.8% se clasificó con prioridad máxima a restaurar. Por otro lado, la superficie con potencial para servir de referencia es de 4753 ha. Además, se generaron mapas de las zonas que necesitan atención prioritaria en restauración ecológica y de los sitios de referencia; lo anterior favorece una planificación eficaz de las áreas a restaurar.

PALABRAS CLAVE: áreas prioritarias, evaluación multicriterio, proceso analítico jerarquizado (PAJ), sitio de referencia, restauración ecológica.

ABSTRACT

Degradation of natural resources has generated the need for ecological restoration. It is therefore necessary to identify in a simple manner the areas to be restored and prioritize the activities. The main aim of this study was to use Multi-Criteria Evaluation to identify priority areas for ecological restoration in the Chignahuapan-Zacatlan region of Puebla, Mexico, and to use remote sensing to determine reference sites for restoration. An Analytic Hierarchy Process through a GIS environment was used to identify priorities for attention. Mapping Information of 12 environmental criteria was used, together with the knowledge of 21 experts in restoration, which was incorporated through pairwise comparison matrices. The reference sites were determined by the supervised classification of satellite images and the exclusion of areas that presented some form of disturbance. The results indicate that about 80% of the area was classified with a level of priority for restoration. However, only 0.8% was classified as maximum priority. On the other hand, the area with potential to serve as a reference within the study area is approximately 4753 hectares. With recognition of these areas to be restored and reference sites in the maps, the efficiency and planning for restoration will be improved.

KEYWORDS: priority areas, multicriteria evaluation, analytical hierarchy process (AHP), reference site, ecological restoration.

INTRODUCCIÓN

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 se manifiesta en la pérdida de vegetación y suelo, aguas contaminadas; contaminación atmosférica; pérdida de recursos genéticos; destrucción de partes vitales de hábitat; cambios climáticos, geológicos y evolutivos (Gálvez, 2002). La restauración ecológica intenta dirigir el sistema por una ruta de estadios sucesivos que recupere la composición de especies y las interrelaciones que tenía la comunidad original en un tiempo relativamente corto (Martínez-Romero, 1996). El proceso de restauración ecológica se puede dividir en niveles o etapas según el estado del área que se va a intervenir, el objetivo y el resultado final del proyecto (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2003).

Una de las primeras acciones a realizar en un proyecto de restauración ecológica es identificar el ecosistema que servirá de referencia para guiar el proceso de restauración, por ejemplo, un ecosistema menos alterado lo más similar posible al ecosistema original del sitio a restaurar, en donde puedan encontrarse los rasgos funcionales y estructurales que se quieran reconstruir (MAVDT, 2003; Society for Ecological Restoration, 2004). El modelo de referencia también puede consistir en descripciones de estos ecosistemas o de las expresiones ecológicas sobresalientes que se desean al restaurar un ecosistema (Clewell y Aronson, 2007).

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, pues se espera que con el tiempo el ecosistema restaurado emule los atributos de la referencia, y se desarrollen las metas y estrategias del proyecto de acuerdo con esas expectativas (SER, 2004). Además, la elección de la referencia depende del estado sucesional del área tratada, por lo que es indispensable que el referente se encuentre bajo condiciones ambientales similares como la altitud, pendiente, u orientación (MAVDT, 2003). Por lo tanto, 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).

¿Dónde actuar primero? es la pregunta clave sobre la restauración y conservación de la naturaleza a causa de la limitación de los recursos financieros. Por tanto, la restauración debería centrarse en áreas con mayor riesgo de degradación y que produzcan los mayores beneficios ambientales. Desafortunadamente, el establecimiento de prioridades ha recibido poca atención en el contexto específico de la restauración ecológica (Geneletti, Orsi, Lanni y Newton, 2011); por lo que usualmente no se cuenta con estrategias para priorizar los esfuerzos de restauración. Muchos de estos trabajos se ubican en pocos sitios específicos por la escasez de recursos económicos disponibles; de manera que, es importante llevar a cabo la identificación de sitios prioritarios en los que la restauración favorezca los mayores beneficios ambientales (Echeverría *et al.*, 2010).

La elección de los sitios destinados a restauración ecológica, es una decisión que debe tomarse en conjunto con los criterios y preferencias de los propietarios y con 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 en las políticas de gestión de autoridades públicas (MAVDT, 2003; Geneletti *et al.*, 2011). La naturaleza del problema de tipo espacial hace necesario el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para manejar de manera sencilla los datos georeferenciados (Geneletti *et al.*, 2011). Los SIG integrados con técnicas de evaluación multicriterio 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 (Gómez y Barredo, 2005; Olivas, Valdez, Aldrete, González y Vera, 2007).

En la Sierra Norte de Puebla, en particular en algunas partes de los municipios de Chignahuapan y Zacatlán, los recursos naturales han sido degradados; por ejemplo, se



ha estimado que hay 7779 ha con problemas de degradación en Chignahuapan y 15 072 ha en el municipio de Zacatlán (Avalos y Baca, 2007). Debido a esto, los objetivos del presente estudio son identificar las áreas con necesidad de ser restauradas y asignarles un nivel de prioridad de atención en los municipios de Chignahuapan y Zacatlán usando una técnica de análisis multicriterio; así como, la identificación de las áreas de referencia mediante teledetección que servirán en futuros trabajos de restauración caracterizados como prioritarios.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del área de estudio

El estudio se realizó en los municipios de Chignahuapan y Zacatlán localizados en el occidente de la Sierra Norte de Puebla (Fig. 1) con una superficie de 124 956 ha (Centro Nacional de Desarrollo Municipal, 1999). Predominan seis tipos de clima, todos catalogados como templados y fríos con humedad clasificada de media y mayor. La zona forma parte del Eje Neovolcánico, con una altitud de

2400 m hasta los 2800 m, en cadenas de cerros bien definidos en el sur y al oriente de la vertiente. Las principales actividades económicas en la zona de estudio son la agricultura y la silvicultura, donde el bosque de coníferas ocupa aproximadamente 43% de la superficie total (Avalos y Baca, 2007).

Base de datos cartográfica

Se recopiló la información cartográfica de la zona de estudio publicada por el INEGI y Conabio escala 1:250 000, la cual se homogeneizó a la proyección Universal de Mercator (UTM) zona 14 y Datum WGS84 (1984), para realizar el modelado cartográfico. También se utilizó un modelo de elevación digital a 30 m (Chávez, 2014) y dos imágenes de satélite Landsat 5 TM del año 2011.

Proceso Analítico Jerarquizado (PAJ)

La identificación de áreas prioritarias con necesidad de restauración, se realizó mediante la técnica de evaluación multicriterio denominada Proceso Analítico Jerarquizado desarrollado (PAJ) por Saaty (Gómez y Barredo, 2005).

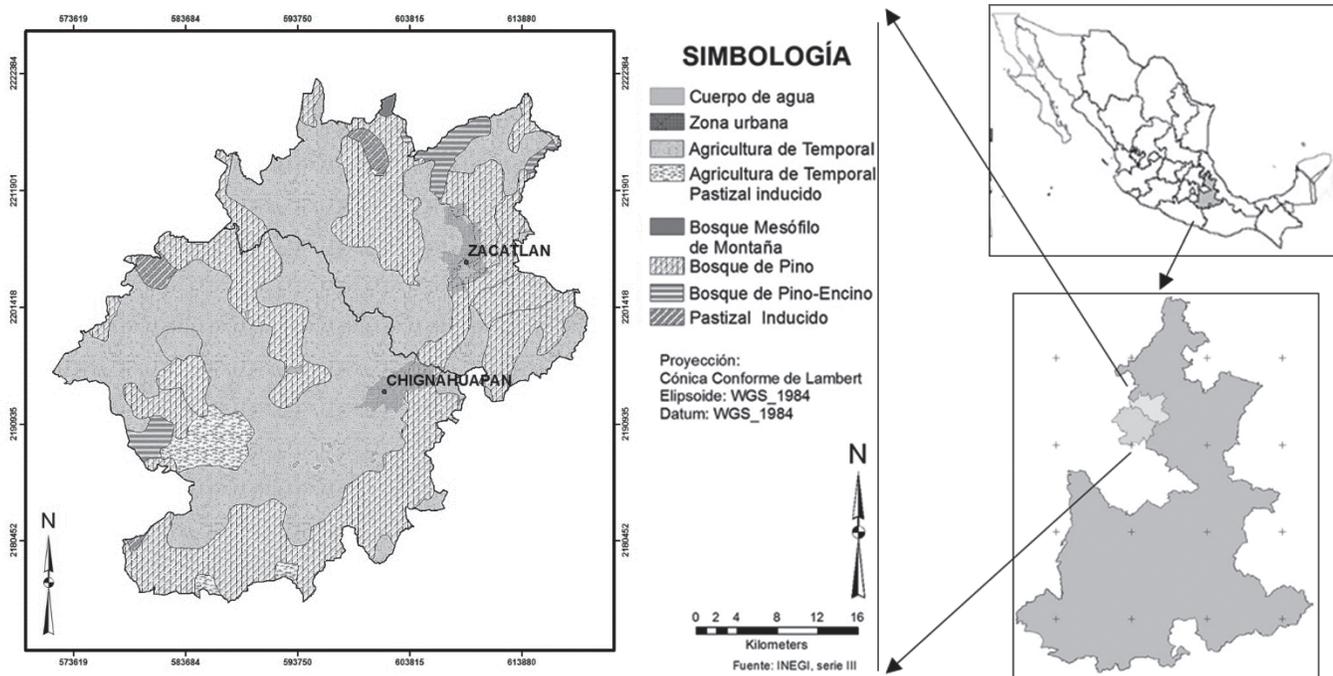


FIGURA 1. Ubicación del área de estudio y su uso del suelo.

Este método 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), lo que corresponde al primer paso del proceso. Mediante el proceso PAJ se consideraron criterios basados en factores que causan algún tipo de degradación en los ecosistemas los cuáles fueron consensuados por 21 expertos en el tema de restauración mediante una encuesta. Los criterios seleccionados fueron: clima (precipitación), suelo (textura, profundidad, nivel de erosión, permeabilidad y humedad del suelo), topografía (pendiente), cobertura vegetal (uso del suelo, presencia de vegetación secundaria y vegetación densa) y perturbación (cercanía a caminos y localidades) (Fig. 2).

Una vez jerarquizado el problema se utilizan técnicas de comparación pareada dentro de cada jerarquía, con la finalidad de hacer juicios simples a través de la jerarquía utilizando la escala fundamental (Tabla 1), y de esta manera llegar a las prioridades globales de dichas alternativas. 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).

Estandarización de criterios

Los mapas de criterios poseen diferentes escalas de medida; el PAJ requiere que los valores de estos sean transformados a unidades comparables para poder correr el modelado cartográfico (Malczewski, 1999). Este procedimiento se realizó estableciendo la prioridad relativa de cada uno de los rangos que comprendía cada criterio, se definieron cinco niveles de prioridad (S1, S2, S3, N1 y N2), donde S1 representa la máxima prioridad y N2 la prioridad nula (Tabla 2). Después de determinada la importancia relativa, se crearon matrices de comparación pareada y mediante el valor máximo (se divide cada valor por el máximo valor), se obtuvieron los valores estandarizados de los subcriterios (Tabla 3).

Obtención de los pesos (W)

La importancia relativa (W) de los subcriterios, se obtuvo mediante la opinión de 21 expertos en el tema de restauración ecológica de México, España, Paraguay y Vene-

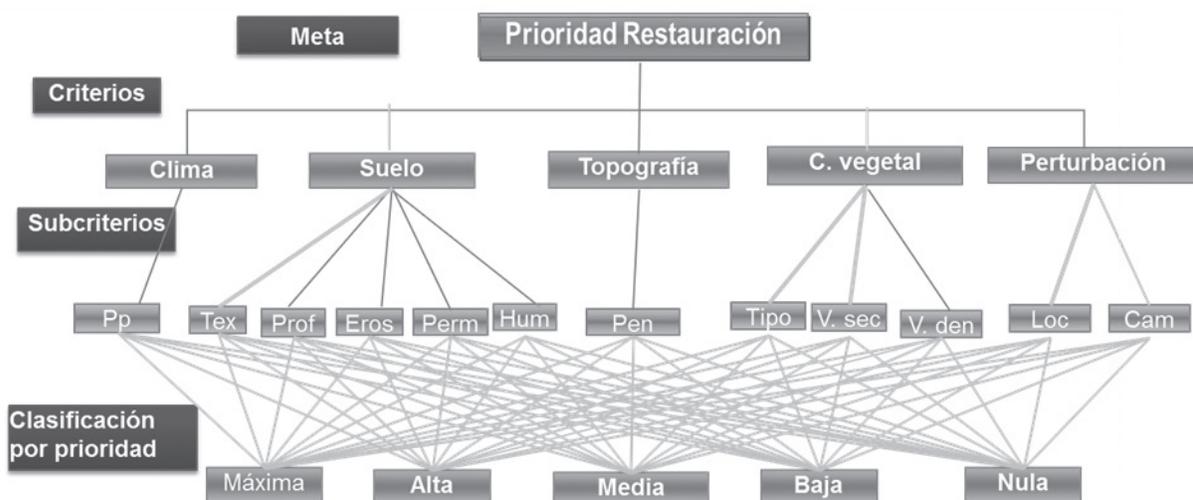


FIGURA 2. Organización jerárquica de los criterios considerados para obtener las áreas prioritarias a restaurar.

Pp: precipitación; Tex: textura; Prof: Profundidad; Eros: erosión; Perm: Permeabilidad; Hum: Humedad; Pen: pendiente; C.vegetal: cobertura vegetal; V.Sec: Vegetación secundaria; V.den: Vegetación densa; Loc: localidades; Cam: caminos.



TABLA 1. 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 $a_{ji}=1/a_{ij}$ al comparar la j con la i	Supuesto razonable

zuela. Los pesos de las matrices construidas por cada experto, así como su consistencia, se calcularon con el módulo Weight del programa IDRISI Selva. Para determinar la importancia relativa (W) de cada criterio se promediaron los resultados de las matrices que resultaron consistentes. La consistencia es el grado de coherencia lógica entre las comparaciones pareadas (Fondo Mexicano para Conservación de la Naturaleza, 2009) y se calculó para asegurar que las respuestas de las matrices fuera lo más objetiva posible, valores de consistencia menores o igual a 0.10 son considerados aceptables (Gómez y Barredo, 2005).

Generación del mapa de áreas prioritarias para restauración ecológica

Se diseñó un modelo cartográfico para crear el mapa de áreas prioritarias para restauración ecológica (Fig. 3), el cual se implementó en el programa IDRISI Selva mediante el módulo Macro Modeler. En el modelo se incluyen restricciones al objetivo como las zonas urbanas, carreteras pavimentadas, caminos de terracería, cuerpos y corrientes de agua. Se crearon mapas booleanos con cada una de las restricciones, en donde a las áreas consideradas restric-

nes se les asignó el valor de 0 y a las áreas consideradas dentro del análisis se les asignó el valor 1. Del mapa de áreas prioritarias para restauración ecológica, se eligieron 98 puntos al azar, se consideraron 20 puntos por prioridad de atención para realizar la verificación en campo (Chuvieco, 2008).

Identificación de los sitios de referencia potenciales

La identificación de los sitios de referencia potenciales en la zona de estudio se realizó mediante una clasificación supervisada de dos imágenes de satélite multispectrales Landsat 5 TM (path y row 25-46 y 26-46), tomadas en el mes de abril del año 2011, a las cuáles se les realizaron correcciones radiométricas, atmosféricas y topográficas, con apoyo del programa IDRISI Selva.

Los sitios de entrenamiento se determinaron a través de salidas de campo, por lo que se georreferenciaron 145 puntos de las cuatro clases determinadas (bosque, zonas de uso agropecuario, áreas desprovistas de vegetación [incluye las áreas urbanas] y cuerpos de agua) (Gil, García, Ponvert-Delisle, Sánchez y Vega, 2003). Con los sitios de entrenamiento se generaron las firmas

TABLA 2. Clasificación de valores para estandarizar los subcriterios para determinar la prioridad de restauración.

Precipitación (mm)		Humedad*		Textura	
Rango	Valor	Rango	Valor	Tipo	Valor
600 - 800	S1	2	S1	Fina	S1
800 - 1200	N1	8	S3	Gruesa	S2
1200 - 1500	S3	10 a 12	N1	Media	S3
1500 - 2000	S3	*Número de meses que permanece con humedad el suelo			
2000 - 2500	S2				
2500 - 4000	S2				
Profundidad (m)		Permeabilidad		Erosión	
Rango	Valor	Tipo	Valor	Tipo	Valor
0 - 1	S1	Media a alta	S3	Severa	S1
> 1	N1	Baja a alta	S2	Media	S2
		Baja a media	S1	Leve	S3
		Baja	S1	Nula	N2
		Alta	N1		
Pendiente (°)		Uso del suelo		Erosión	
Rango	Valor	Tipo	Valor	Tipo	Valor
0 a 10	N1	Agrícola	S1	Severa	S1
10 a 20	S3	Bosque	N1	Media	S2
20 a 30	S2	Matorral	S2	Leve	S3
> 30	S1	Pastizal	S1	Nula	N2
		Sin vegetación	S1		
Pendiente (°)		Uso del suelo		Erosión	
Rango	Valor	Tipo	Valor	Tipo	Valor
0 a 10	N1	Agrícola	S1	Severa	S1
10 a 20	S3	Bosque	N1	Media	S2
20 a 30	S2	Matorral	S2	Leve	S3
> 30	S1	Pastizal	S1	Nula	N2
		Sin vegetación	S1		
Vegetación densa		Vegetación secundaria		Localidades	
Tipo	Valor	Tipo	Valor	Tipo	Valor
Presente	N1	Presente	S2	50-200	S1
Ausente	S1	Ausente	S1	200-600	S2
				600-1000	S3
				>1000	N1
Caminos					
Tipo	Valor				
50-200	S1				
200-600	S2				
600-1000	S3				
>1000	N1				



Tabla 3. Matriz de comparación pareada para estandarizar el subcriterio 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

S1= Máxima prioridad; S2= Alta prioridad; S3= Media prioridad; N1= Baja prioridad y N2= Nula prioridad

espectrales con el módulo Makesig del programa IDRISI. La clasificación se ejecutó con el método Fisher (Discriminación lineal) en el programa IDRISI Selva, después se eliminaron los pixeles aislados y se generalizó la ima-

gen clasificada aplicando un filtro de modo (Eastman, 2012).

La validez de la clasificación se realizó mediante una “matriz de confusión”, de la cual se obtuvo la fiabilidad global de la imagen clasificada y el índice Kappa (Chuvieco, 2008). La verificación en campo, se llevó a cabo bajo un diseño aleatorio simple con 110 puntos de muestreo, aproximadamente 27 por clase temática. Con la clase temática determinada como bosque, se realizó un mapa booleano y se eliminaron las áreas con algún tipo de perturbación, como las áreas bajo algún tipo de aprovechamiento y zonas donde hay trabajos de conservación y restauración de suelos. La información se obtuvo de la Comisión Nacional Forestal (2010, 2011 y 2012), quedando presumiblemente las áreas con vegetación con menor perturbación mediante álgebra de mapas.

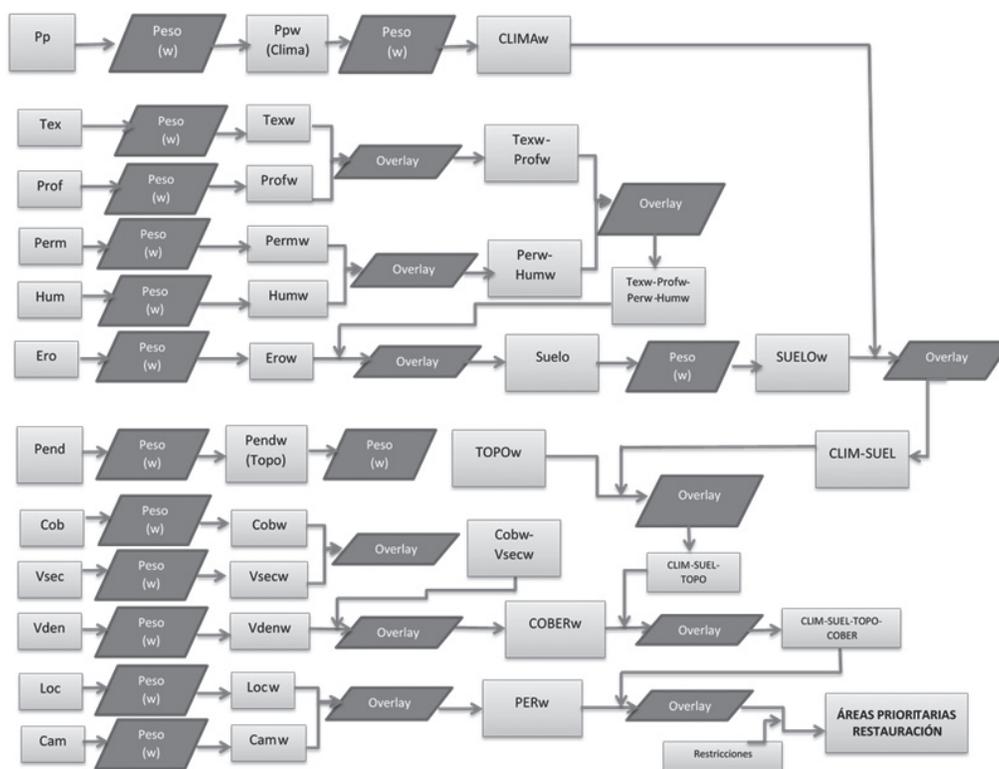


FIGURA 3. Modelo cartográfico para generar el mapa de áreas prioritarias para restauración ecológica. Pp: precipitación; Tex: textura; Prof: Profundidad; Eros: erosión; Perm: Permeabilidad; Ero: erosión; Hum: Humedad; Pen: pendiente; Cob: cobertura vegetal; VSec: Vegetación secundaria; Vden: Vegetación densa; Loc: localidades; Cam: caminos; Topo: topografía; Cober: cobertura.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una fase crucial del PAJ es la asignación de pesos a los subcriterios, de las 21 encuestas aplicadas a expertos, únicamente 14 criterios resultaron consistentes. La opinión de los expertos fue variable, existiendo diferencias de hasta 0.73 entre valores máximos y mínimos (escala es de 0 a 1), por tanto, se utilizaron los promedios de los vectores calculados de las matrices consistentes. De tal manera que fue factible aplicar la técnica apropiadamente con los pesos asignados a cada criterio y subcriterio (Tabla 4).

La prioridad de restauración dominante es la prioridad baja (56%) y se encuentra principalmente en las áreas boscosas destinadas a la silvicultura (Fig. 4). En segundo lugar, las áreas sin prioridad que ocupan 21% de la superficie (Tabla 5) con presencia de vegetación boscosa densa. En ambas categorías se concentran aproximadamente tres cuartas partes de la superficie de la región Chignahuapan-Zacatlán.

La prioridad de restauración media concentró 14% de área de estudio caracterizándose por ser áreas destinadas a la agricultura y ganadería y en algunos casos con problemas de erosión. Mientras que la prioridad alta y máxima agrupó únicamente 4% de la superficie principal-

mente en la parte noreste y central en áreas que en algún momento fueron usadas para actividades agropecuarias. A pesar de ser un área de menor proporción, debido a las características de pendiente alta o descubiertas de vegetación, requieren atención en el corto plazo para evitar un proceso de deterioro mayor. La ventaja de usar la evaluación multicriterio es que proporciona una herramienta de manejo para la determinación de sitios prioritarios con diferentes fines de manera fácil y precisa (Echeverría *et al.*, 2010; Bojórquez-Tapia *et al.*, 2004; Cipollini, Maruyama y Zimmerman, 2005).

Cabe señalar que en la verificación de campo se obtuvo 75% de certeza. Los resultados obtenidos se consideran aceptables, sin embargo, podrían obtenerse mejores resultados si se anexaran más criterios al estudio y se manejara una escala más grande, para lo cual se tendría que generar la cartografía de la zona de estudio. Otro punto, que podría mejorar los resultados sería incluir la opinión de personas que habitan en la zona de estudio, ya que ellas conocen mejor las condiciones biofísicas del área y su comportamiento a lo largo del tiempo.

Al identificar los sitios de referencia, la clasificación supervisada indicó 46% para la categoría de bosque, 42%

TABLA 4. Pesos de criterios y subcriterios, definidos por los expertos.

Criterios					
Criterio	Peso (W)	Criterio	Peso (W)		
Clima	0.0856	Cobertura Vegetal	0.3254		
Suelo	0.2843	Perturbación	0.3060		
Topografía	0.3048				
Subcriterios					
Suelo	Peso (W)	Cobertura vegetal	Peso (W)	Perturbación	Peso (W)
Textura	0.1409	Uso del Suelo	0.5674	Localidades	0.4452
Profundidad	0.1478	Vegetación secundaria	0.1388	Caminos	0.5548
Permeabilidad	0.1268	Vegetación densa	0.2938		
Erosión	0.4296				
Humedad	0.1550				

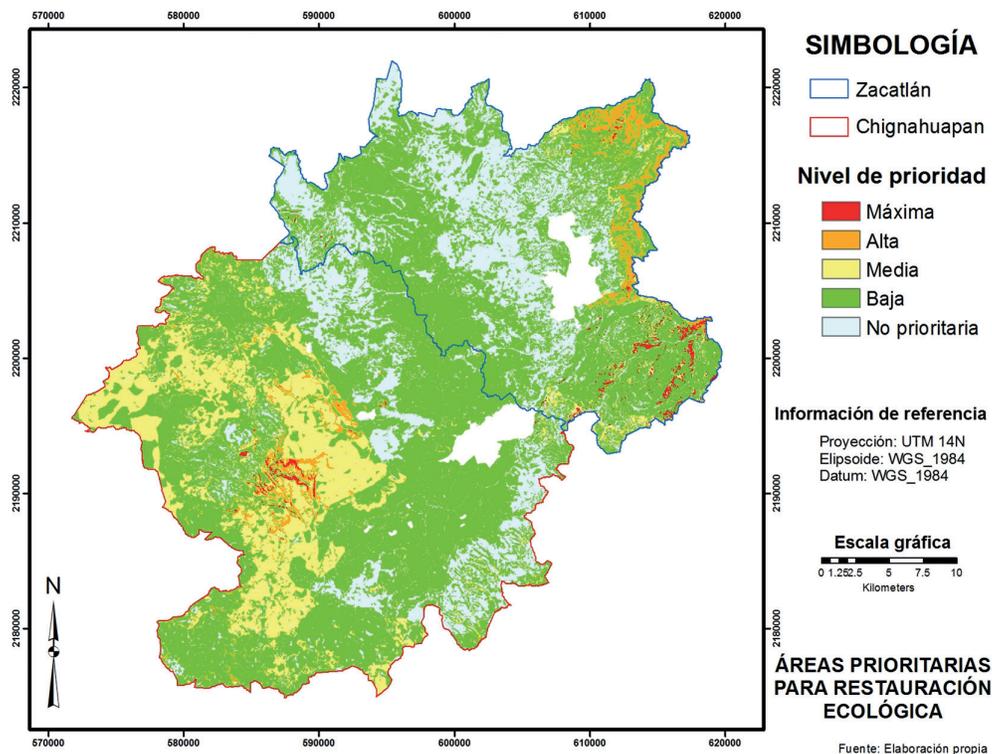


FIGURA 4. Distribución de las áreas con necesidad de ser restauradas clasificadas por orden de prioridad en Chignahuapan y Zacatlán.

TABLA 5. Superficie ocupada por prioridad de restauración en los municipios de Chignahuapan y Zacatlán, Puebla.

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	1894.0	2.49	2344.5	4.79	4238.5	3.39
Media	15899.4	20.91	1518.7	3.10	17.418.1	13.94
Baja	44332.0	58.31	26596.9	54.35	70928.8	56.76
No prioridad	10878.8	14.31	15293.3	31.25	26172.2	20.95
Total	73275.83		46462.44		119738.27	

1. Superficie total de Chignahuapan, 76 023 ha
 2. Superficie total de Zacatlán, 48 933 ha
 3. Superficie total del área de estudio de 124 956 ha

para las áreas con uso agrícola y pecuario, y 11.5% para las áreas sin vegetación aparente y áreas con uso urbano. La exactitud global del proceso de clasificación es de 79%, de acuerdo con lo obtenido en la matriz de confusión (Tabla 6), considerándose aceptable para imágenes Landsat (Chuvieco, 2008); así mismo se obtuvo un valor de

0.67 de Índice Kappa, que de acuerdo con Landis y Koch (1977), es considerado como bueno. En el caso particular de la categoría Bosque —objetivo de la investigación— se tienen valores altos en la confiabilidad (> 84%); lo cual indica que la cobertura de bosque se ha clasificado de manera correcta y el error se disminuye en gran medida.

TABLA 6. Matriz de confusión resultante de la clasificación supervisada.

Clases*	Datos de referencia (terreno)				Total	Exactitud Usuario	Error Comisión
	1	2	3	4			
Datos de Clasificación	1	43	0	1	7	84.3	16
	2	0	4	0	0	100	0
	3	0	0	8	8	50	50
	4	2	0	5	31	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.

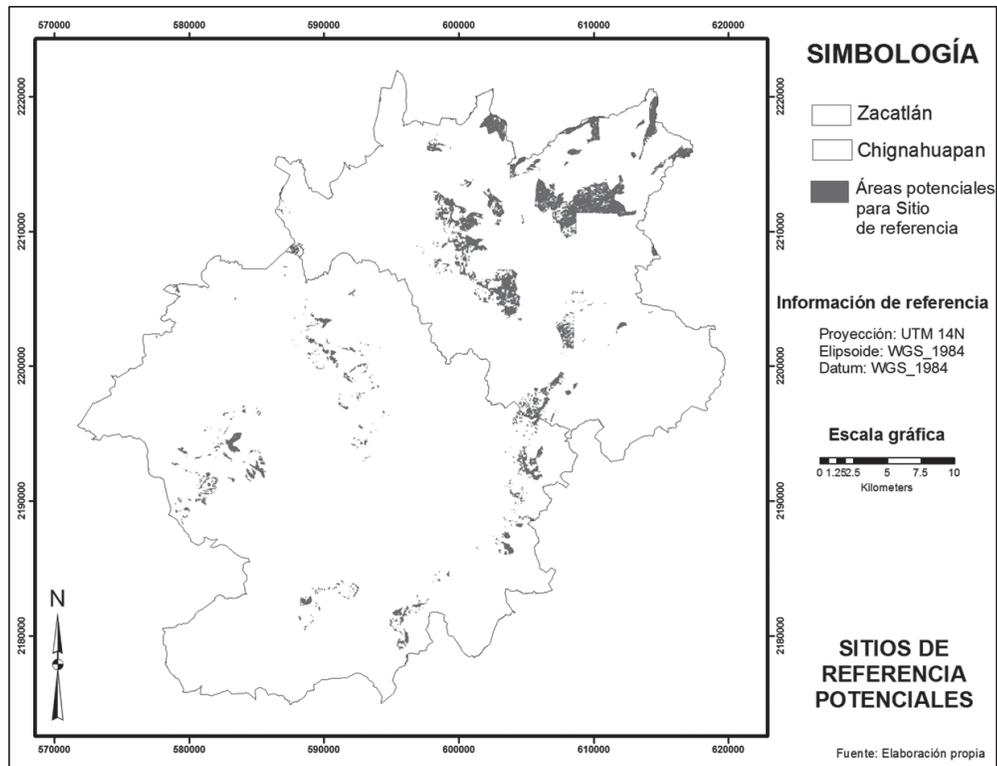


FIGURA 5. Distribución de las áreas con potencial para ser usadas como sitios de referencia en la región Chignahuapan-Zacatlán.

Una vez eliminadas las áreas con algún tipo de perturbación, las zonas con potencial para fungir como sitios de referencia se estimaron en aproximadamente 4753 ha (Fig. 5), de las cuáles 3637 ha corresponden al municipio

de Zacatlán y 1115 ha al municipio de Chignahuapan. Al sobreponer el mapa de sitios de referencia con el mapa de áreas prioritarias para restauración ecológica, se vuelve de mayor importancia ya que facilita la ubicación de las posi-



bles áreas que servirán como bosques o sitios de referencia más cercanas al sitio de restauración (Moore, Covington y Fulé, 1999).

CONCLUSIONES

La mayor parte de la región Chignahuapan-Zacatlán (79%) se calificó con alguna prioridad de restauración y solamente 21% se consideró como de nula prioridad. En la región, solo una pequeña porción del total (4%) correspondió a prioridades alta y máxima y aunque es poca la superficie, esta debe atenderse de manera prioritaria para evitar un mayor deterioro en el corto o mediano plazo. Por otro lado, en la región se detectó 8% de la superficie boscosa con potencial para fungir como sitios de referencia para la restauración. Dada la capacidad que tiene para combinar múltiples criterios de decisión, incorporar los juicios y opiniones de las diferentes partes interesadas, así como tratar información espacial, el Proceso Analítico Jerarquizado se adecuó en la identificación de áreas potenciales prioritarias para restauración ecológica y para la priorización de actividades.

RECONOCIMIENTOS

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 Montecillos. Agradecemos el apoyo del Ing. Manuel Morales Martínez, presidente de la Asociación Regional de Silvicultores de Chignahuapan-Zacatlán, por el apoyo brindado en el desarrollo del estudio.

REFERENCIAS

Avalos, F. S. y Baca C., J. C. (2007). Diagnóstico socioeconómico 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.

Gómez D., M. y Barredo C., J. I. (2005). *Sistemas de Información geográfica y evaluación multicriterio, en la ordenación del territorio (2a ed.)*. Madrid, España: RA-MA.

Bojórquez-Tapia, L. A., de la Cueva, H., Díaz, S., Melgarejo, D., Alcantar, G., Solares, M. J., Grobet, G. y Cruz-Bello, G. (2004). Environmental conflicts and nature reserves: redesigning Sierra San Pedro Mártir National Park, México. *Biological Conservation*, 117 (2), 111-126.

Centro Nacional de Desarrollo Municipal. 1999. *Enciclopedia de los Municipios de México: Los Municipios de Puebla*. Gobierno del Estado de Puebla. Recuperado de <http://www.e-local.gob.mx/work/templates/enciclo/puebla/Mpios/21053a.htm>.

Chávez G., H. (2014). *Áreas prioritarias mediante escenarios de deforestación y servicios ambientales en la Sierra Norte de Puebla*. Tesis de maestría no publicada, Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de México.

Chuvieco, S. E. (2008). *Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el Espacio (3a ed.)*. Barcelona, España: Ariel.

Cipollini, K., Maruyama, A. L. y Zimmerman, C. L. (2005). Planning for restoration: a decision analysis approach to prioritization. *Restoration Ecology*, 13 (3), 460-470.

Clewell, A. F. y Aronson, J. (2007). *Ecological restoration principles, values, and structure of an emerging profession*. Washington, D.C.: Society for Ecological Restoration International.

Eastman, R. J. (2012). *IDRISI Selva. Guía para SIG y procesamiento de imágenes. (Manual versión 17)*. Argentina: Clark University.

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

Fondo Mexicano para Conservación de la Naturaleza. (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)*. México: United States Agency for International Development.

Gálvez, J. (2002). *La restauración ecológica: conceptos y aplicaciones*. Guatemala, Guatemala: Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente.

- Geneletti, D., Orsi, F., Lanni, E. y Newton, A. C. (2011). Identificación de áreas prioritarias para la restauración de bosques secos. En A. C. Newton y N. Tejedor (Eds.), *Principios y práctica de la restauración del paisaje forestal: Estudios de caso en las zonas secas de América Latina* (290-327). Gland, Suiza y Madrid, España: UICN.
- Gil, J. L., García, E. B., Ponvert-Delisle, D. R., Sánchez, R. y Vega, M. B. (2003). Enfoques para la clasificación digital de imágenes mono y multispectrales y su implementación en el software cubano TN Estudio V2.0. *Revista de Teledetección*, 20, 35-52.
- Landis, J. R. y Koch, G. G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 33 (1), 159-174.
- Malczewski, J. (1999). *GIS and Multicriteria decision analysis*. Ontario, Canadá: John Wiley. Inc.
- Martínez-Romero, E. 1996. La restauración ecológica. *Ciencias*, 43, 56-61.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2003). *Restauración de ecosistemas a partir del manejo de la vegetación. Guía metodológica*. Bogotá D. C., Colombia.
- Moore, M. M., Covington, W. W. y Fulé, P. Z. (1999). Reference conditions and ecological restoration: a southwestern Ponderosa pine perspective. *Ecological Applications*, 9 (4), 1266-1277.
- Olivas G., U. E., Valdez L., J. R., Aldrete, A., González G., M. J. y Vera C., G. (2007). Áreas con aptitud para establecer plantaciones de maguey cenizo: definición mediante análisis multicriterio y SIG. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 30 (4), 411-419.
- Society for Ecological Restoration. (2004). *Principios de SER International sobre la restauración ecológica*. Tucson, Arizona.

Manuscrito recibido el 25 de marzo de 2014.
Aceptado el 6 de junio de 2016.

Este documento se debe citar como:
González O., M. L., Plascencia-Escalante, F. O. y Martínez-Trinidad, T. (2016). Áreas prioritarias para restauración ecológica y sitios de referencia en la región Chignahuapan-Zacatlán. *Madera y Bosques*, 22 (2), 41-52.