

IDRISI COMO HERRAMIENTA PARA LA EVALUACIÓN DE ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS. EL CASO DEL PARQUE NACIONAL NEVADO DE TOLUCA

*Sergio Franco Maass, Héctor Hugo Regil García**

RESUMEN

Las áreas naturales en México se encuentran sujetas a intensos procesos de deterioro como resultado de la creciente intervención humana. Tal es el caso del Parque Nacional Nevado de Toluca localizado en la zona central del país. Mediante la aplicación del SIG Idrisi fue posible generar una base de datos para su caracterización general y evaluar los cambios en el uso del suelo a lo largo de un periodo de 30 años. Con los datos generados se analizaron los procesos de regeneración y deterioro de los bosques. También se determinó el nivel de adecuación del territorio para el desarrollo de especies agrícolas y forestales dentro del área natural protegida. Los resultados obtenidos permiten corroborar que el parque nacional se viene deteriorando muy rápidamente y está siendo ocupado por actividades agrícolas y pecuarias para las que presenta niveles bajos de aptitud. La aplicación del Idrisi se vislumbra como una alternativa importante para continuar con el monitoreo del parque.

Palabras clave: SIG Idrisi, uso del suelo, Parque Nacional Nevado de Toluca, México, nivel de adecuación.

ABSTRACT

Population growth in Mexico is affecting the natural protected areas of the country. This is the case of the Nevado de Toluca National Park, located in central Mexico. Application of the GIS Idrisi has been very useful to generate a cartographical database of the protected area and to evaluate the land-use changes over a 30-year period. With the land-change results it was possible to analyze the

* Instituto de Ciencias Agropecuarias y Rurales, Universidad Autónoma del Estado de México, Instituto Literario 100 Colonia Centro, Toluca, México. C.P. 50130
sfrancom@uaemex.mx; regil_hh@yahoo.com.mx

Fecha recepción: 25 de enero del 2010
Fecha aprobación: 15 de mayo del 2010

recovery-degradation processes. In order to define alternatives for the protection of the national park, a sustainability analysis is carried out for the main forestall and agricultural species. The primary results of the application allowed us to confirm there is a serious degradation process in the protected area. The Idrisi is seen as an important alternative for continued monitoring of the park.

Keywords: GIS Idrisi, land use, Nevado de Toluca National Park, Mexico, sustainability standard

1. Introducción

El Parque Nacional Nevado de Toluca (PNNT) constituye una de las principales reservas de recursos naturales del Estado de México y es considerado como un espacio natural representativo de la biodiversidad de las montañas templadas en México. El área natural protegida cuenta con un patrimonio ecológico muy importante y es un proveedor neto de servicios ambientales, entre los que destacan: la regulación del ciclo hidrológico, la conservación de suelos, la captura de carbono, la aportación de oxígeno a la atmósfera y el soporte de actividades turísticas, recreativas y de investigación. Debido a su cercanía con la zona metropolitana de la ciudad de Toluca que cuenta con más de 2 millones de habitantes, el parque nacional se encuentra sujeto a intensos procesos de deterioro y cambio de uso del suelo como resultado del deficiente manejo de los recursos forestales. Pese al creciente interés de la comunidad científica por estudiar esta región, no existían estudios suficientemente detallados y confiables que permitieran conocer estas dinámicas. En este contexto, se emprendió la generación de una base de datos que posibilitara la caracterización físico geográfica del Área Natural Protegida (ANP) y la realización de una serie de análisis para identificar los procesos de cambio y deterioro de las cubiertas forestales. De esta manera, mediante el software de SIG Idrisi y el manejo de datos espaciales en formato raster, fue posible lograr un primer acercamiento a la comprensión de la dinámica tan compleja que reviste el área de estudio.

El Instituto de Ciencias Agropecuarias y Rurales (ICAR) de la Universidad Autónoma del Estado de México; a través de su cuerpo académico de Manejo y Conservación de Recursos, participa en el Centro de Recursos de Idrisi México y ha venido utilizado el software como herramienta fundamental para el análisis espacial. Se trata de una herramienta que ha permitido lograr una serie de análisis complejos del territorio a partir de información geográfica, representada bajo una estructura muy simple. El presente documento describe algunas de las aplicaciones del Idrisi para el estudio del Parque Nacional Nevado de Toluca.

2. Área de estudio

El parque Nacional Nevado de Toluca se localiza en el Sistema Volcánico Transversal, en el Estado de México, entre los municipios de Zinacantepec, Toluca, Calimaya, Tenango del Valle, Villa Guerrero, Coatepec Harinas, Almoloya de Juárez, Temascaltepec y Amanalco de Becerra; se localiza a 50 kms. de la Ciudad de Toluca, por la carretera Toluca - Sultepec; entre los 2 102 398 y los 2 134 700 metros Norte y los 399 833 y los 432 253 metros Este en coordenadas UTM (Figura 1).

El límite inferior del Parque Nacional fue definido en 1936, año en que fue decretado el parque nacional, siguiendo la curva de los 3000 msnm. Dentro de esta superficie está comprendida la Reserva Forestal Nacional, limitada hacia el norte por el cerro las Palomas y la Ranchería de Agua Blanca, al este por la Cruz del Escapulario, Llano del Tejón y la Puerta del Toro, al sur por el Arenal y al oeste por el Llano del Tejón (SAG, 1970).

Figura 1. Ubicación del Parque Nacional Nevado de Toluca



Fuente: Elaboración propia

3. Metodología

El desarrollo de la aplicación partió de la definición de un conjunto de objetivos específicos. Se trataba de generar una base de datos y de diseñar un conjunto de procedimientos de análisis para:

- a. Realizar la caracterización físico geográfica del parque nacional

- b. Analizar los cambios del uso del suelo y la vegetación en un periodo determinado
- c. Identificar las dinámicas de recuperación o deterioro de las zonas forestales
- d. Determinar el nivel de adecuación del territorio para el desarrollo de los principales cultivos en la región o para la reintroducción de las especies forestales endémicas en la zona.

De esta manera, el planteamiento metodológico requirió seguir una serie de etapas:

- Etapas 1. Creación de la base de datos cartográficos para la caracterización físico geográfica
- Etapas 2. Diseño y aplicación de los procedimientos de análisis espacial
- Etapas 3. Obtención y análisis de resultados

3.1. Creación de la base de datos cartográficos del Parque Nacional Nevado de Toluca

La creación de la base de datos geográficos del área de estudio implicó la elaboración de diversas coberturas y, en algunos casos, la conversión (o digitalización) de mapas en papel al formato digital de Idrisi.

La obtención de una base cartográfica confiable incluyó la creación de las siguientes coberturas:

1. Uso de suelo y vegetación para diferentes fechas (1972 y 2000)
2. Precipitación pluvial
3. Temperatura
4. Edafología
5. Altitud
6. Pendiente
7. Zonas de extracción de recursos forestales
8. Localidades
9. Vías de acceso

A continuación se describe el proceso de obtención de cada una de las coberturas temáticas para la caracterización físico geográfica del parque nacional.

3.1.1. Coberturas de uso de suelo y vegetación

El análisis de cambio de uso de suelo requirió la obtención de mapas de uso del suelo correspondientes al menos a dos fechas. Dadas las fuentes de información disponible se crearon las coberturas correspondientes en el año 1972 y el 2000. La elaboración del mapa de Uso de Suelo y Vegetación de 1972 se basó en la digitalización de las cartas de Uso de Suelo y Vegetación, escala 1:50 000, publicadas en papel por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática con base en un vuelo fotográfico de 1972 (claves E14-A37, E14-A47 y E14-A48). Para la conversión a formato digital se llevó a cabo un proceso de digitalización interactiva con base en imágenes en formato TIF (generadas con un escáner de gran formato y el programa Oi/GFS). Para ello se utilizó un programa de Diseño Asistido por Computadora (CAD) que posibilitó el escalado, ajuste ortogonal y geoposicionamiento de las imágenes.

La digitalización de rodajes se realizó directamente mediante el seguimiento de líneas en pantalla, utilizando como guía complementaria los archivos digitales de curvas de nivel. Esto permitió corregir en buena medida las deformaciones de las imágenes raster, y obtener una mayor precisión. Una vez concluida la digitalización, previo a ser importado en el ambiente Idrisi, se corrigieron los errores del archivo vectorial mediante una limpieza topológica dentro del ambiente del SIG ArcView 3.2.

La elaboración del mapa de Uso de Suelo y Vegetación del año 2000 se basó en un proceso de interpretación de fotografías aéreas digitales escala 1:37,500. Ello implicó el cumplimiento de dos etapas fundamentales: la de preparación y la de interpretación propiamente dicha.

La interpretación interactiva en el ambiente digital se basó en la creación de un mosaico de ortofotos digitales del Instituto de Investigación e Información Geográfica, Estadística y Catastral del Estado de México (III-GECEM) y del análisis de pares estereoscópicos de fotografías aéreas. Para la definición de las coberturas vegetales se utilizaron las mismas categorías de la Uso de Suelo y Vegetación del INEGI de 1972. Los criterios que permitieron reconocer los diversos tipos de cobertura fueron tamaño, forma, tono, textura y patrón (Verstappen, 1977). Terminada la fotointerpretación fue necesario, previo a su integración en el SIG Idrisi, realizar una limpieza topológica para eliminar los errores y convertir polilíneas a polígonos con una base de datos propia. Este proceso se realizó en el ambiente del Autodesk Map

2004 y siguiendo la misma metodología descrita para la limpieza topológica del mapa de Uso del Suelo y Vegetación de 1972.

3.1.2. Meteorología (precipitación pluvial y temperatura)

Para la generación de los mapas de temperatura y precipitación se utilizó la información de 63 estaciones meteorológicas ubicadas en torno al Parque Nacional. Para efectos de la calidad de la información utilizada se consideraron únicamente las estaciones con registros completos de por lo menos 5 años anteriores a la última fecha de registro. Una vez depurada la información se generaron los mapas de isotermas (temperatura media anual) e isoyetas (precipitación anual). Para el mapa de temperatura se aplicó un proceso de interpolación de líneas y para el mapa de precipitación, teniendo espacialmente ubicadas las estaciones climáticas con su valor de precipitación anual, se aplicó un proceso de interpolación de puntos. En ambos casos se utilizó el Idrisi Kilimanjaro.

3.1.3. Edafología (textura y pH)

En cuanto a los aspectos edáficos, se generaron los mapas de pH y textura según la cartografía disponible. En éste sentido, los mapas fueron obtenidos a partir de la Carta de Unidades Edáficas, elaborada para el proyecto “Evaluación edafológico-Climática para la introducción de frutales perennes y pastos retenedores de suelo en el Parque Nacional Nevado de Toluca” (Franco, 2005).

Partiendo del hecho de que en la base de datos de mapa de unidades edáficas se encuentra un campo de textura para cada polígono, se efectuó un proceso de reclasificación. El mapa generado resultó con únicamente 2 categorías: textura areno-franca y franca. Para la obtención del mapa de pH, se realizó una reclasificación del mapa de unidades de suelo, resultando 14 categorías.

3.1.4. Fisiografía (altitud y pendiente)

Respecto con los aspectos fisiográficos, se generaron los mapas de altitud y pendientes, tomando como insumo principal, las curvas de nivel digitales de INEGI, correspondientes a las cartas E14 A37, E14 A47 y A14 A48, para ambos casos. A partir de las curvas de nivel se generó un Modelo Digital del Terreno (MDT) que permitió derivar valores altitudinales y elaborar la cartografía de pendientes en grados.

3.1.5. Extracción de recursos forestales

La caracterización de las zonas de extracción de recursos forestales se derivó de levantamientos de campo, correspondientes a 126 sitios de muestreo dasométrico y epidométrico. La aplicación de una cédula de levantamiento de información ecológica y la aplicación de 164 encuestas con los campesinos de la zona posibilitaron la rodalización de unidades con los datos de extracción y sobreexplotación por tipo de recurso.

3.2. Diseño y aplicación de los procedimientos de análisis espacial

Como se ha mencionado previamente, la aplicación del SIG Idrisi buscaba cumplir con tres objetivos de análisis: conocer los cambios del uso del suelo y la vegetación en los periodo 1972-2000; identificar las dinámicas de recuperación o deterioro en el parque nacional y; determinar el nivel de adecuación del territorio para el desarrollo de cultivos y especies forestales endémicas..

3.2.1. Análisis del cambio de uso de suelo y vegetación

El mapa de cambio de uso de suelo y vegetación se obtuvo mediante un procedimiento de tabulación cruzada en el ambiente raster de Idrisi. Para ello fue preciso llevar a cabo una reclasificación de los mapas de uso del suelo y vegetación para obtener un menor número de categorías temáticas (14 categorías por mapa). Una de las ventajas del Idrisi consiste en que a partir del proceso de tabulación cruzada es posible generar una matriz de transición (Ordóñez y Martínez, 2003), como insumo principal para analizar el cambio de uso de suelo (Dirzo y Masera, 1996).

3.2.1.1. Criterios de reclasificación

Como se ha mencionado previamente, la tabulación cruzada en el ambiente Idrisi requería realizar una reclasificación de los mapas originales de uso del suelo y vegetación. Para ello fue imprescindible que las categorías de la leyenda de ambas fechas fueran comparables. Por ello se aplicó el mismo criterio de reclasificación de los mapas originales que se encontraban bajo el mismo sistema de clasificación. Se tomó en cuenta, como criterio principal de reclasificación, la posibilidad de evidenciar la perturbación sufrida en la cobertura forestal en cuanto a su pérdida, ganancia y cambios de densidad

del arbolado. De esta manera se procedió a reclasificar ambos mapas teniendo en cuenta la densidad del arbolado en función de las características de cada especie forestal. Se utilizó el esquema de reclasificación propuesto por Ramírez (2001), que parte de dividir a los boques como densos, semi-densos (o semiabiertos) y fragmentados (Cuadro 1).

Cuadro 1. Categorías de la leyenda de los mapas reclasificados

Categoría
Agrícola
Forestal Oyamel Denso
Forestal Oyamel Semidenso
Forestal Oyamel Fragmentado
Forestal Cedro Denso
Forestal Cedro Semidenso
Forestal Cedro Fragmentado
Forestal Pino Denso
Forestal Pino Semidenso
Forestal Pino Fragmentado
Forestal Latifoliado Denso
Forestal Latifoliado Semidenso
Forestal Latifoliado Fragmentado
Otros usos no forestales

Fuente: Elaboración Propia

3.2.1.2. Sobreposición o cruce tabular (CROSSTAB)

El proceso de sobreposición llamado cruce de tablas o Crosstab de Idrisi permitió generar tanto el mapa de cambios como la matriz de transición que muestra, numéricamente, los cambios sufridos en el periodo. De esta manera se obtuvo la matriz de probabilidad de transición que señala, en términos relativos, la posibilidad que tiene una categoría de uso de suelo y vegetación de mantener su condición o de cambiar a otra categoría. Esto se logra comparando la superficie original de la primera fecha con la obtenida para la nueva fecha con sus respectivas transiciones (Bocco *et al.*, 2001).

El objeto primordial de éste proceso es el no solo observar el comportamiento de una categoría de uso de suelo en un periodo de tiempo tiempo, sino también estimar la posibilidad de cambio que tiene una categoría hacia a otra, con lo cual se pueden estimar los próximos escenarios de uso de suelo.

3.2.2. Análisis de recuperación-deterioro forestal

Derivado del mapa de cambio de uso de suelo, y tomando en consideración que las categorías de la leyenda expresan la densidad del arbolado, fue posible obtener no solo la tasa de deforestación, sino la dinámica de pérdida en densidad forestal. Así, con base en los mapas de transiciones de cada una de las asociaciones forestales, se procedió a generar un mapa de Perturbación-Recuperación para cada una de las especies forestales de mayor importancia (Oyamel, Pino y Latifoliadas). Esto se logró gracias a un nuevo proceso de reclasificación, en el cual se asignó, a cada mapa, un valor 0 a las transiciones que no estuvieran involucradas a la especie forestal en cuestión.

Para la elaboración del mapa de zonas de perturbación y recuperación forestal general, fue necesaria una nueva reclasificación basada en el análisis del mapa de cambio de uso de suelo. Dicha reclasificación se basó en la transición que sufrió el área de estudio en el periodo manejado en cuanto a su cambio de densidad forestal, y según eso, se determinaron 6 categorías de perturbación y recuperación.

3.2.3. Análisis del nivel de adecuación del territorio para especies forestales y agrícolas

En el área de estudio existen intensos procesos de antropización. Una de las modificaciones más notables es el establecimiento de terrenos agrícolas en zonas inicialmente forestales. Así, una vez identificadas las zonas de mayor deterioro en el parque nacional, resultaba imprescindible definir la aptitud del territorio para la reintroducción de las especies forestales endémicas. De igual forma, y a manera de comparación, se planteó la posibilidad de evaluar el nivel de adecuación del territorio para el desarrollo de los principales cultivos que se practican en la región.

El procedimiento de análisis se basó en la aplicación de técnicas de evaluación multicriterio considerando los siguientes criterios: pH, Textura del suelo, Precipitación anual, Temperatura, Altitud y Pendiente. Los valores mínimo, óptimo y máximo se obtuvieron a partir de los requerimientos por especie reportados en la literatura especializada. En particular se utilizaron las fichas técnicas para reforestación de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR, 2006), así como los datos reportados por Aragón (2003) para especies agrícolas (Cuadro 2):

Cuadro 2. Requerimientos de las especies estudiadas

Especie	pH	Textura	Temperatura			Precipitación			Altitud			Pendiente °
			Media	Óptima.	Máxima	Mínima	Óptima	Máxima	Mínima	Óptima	Máxima	
<i>Pinus hartwegii</i>	6.1-6.9	Franco-arenosa	-10	12	42	600	1000	1450	2200	3400-3600	4106.94	0-46
<i>Abies religiosa</i>	5.0-7.0	Limo- arenosa, Arcillo-arenosa, Arenosa	-12	7 a 15	20	800	1000	1500	2800	3200	3697.26	0-48
<i>Pinus montezumae</i>	5.0-7.0	Franco-arenosa, arenosa, arenolimosa	-14	8 a 14	40	500	800	1500	1150	2500	3150	0-45
<i>Pinus ayacahuite</i>	5.0-8.0	Arcillosa, Franco-arcillosa, franco-limosa, franco arenosa	-8	12 a 19	35	700	800	1200	2000	2700	3200	0-45
<i>Alnus acuminata</i>	4.0-6.0	Arenosos o Arcillosos	4	12 a 23	27.5	500	800	1000	600	2600	3666.19	0-52
<i>Quercus laurina</i>	4.8-7.5	Limosa, arcillosa, franca-arcillosa-arenosa, franca-arenosa	-3	15 a 18	22	400	1400	1750	1500	2000-2400	3300	0-46
<i>Solanum tuberosum</i>	5.5 a 6, hasta 4.4 ácido	Franco, franco-arcillo-limosos, franco-arenoso	5	18 a 21	30	400	600	1300	400	2000	3450	0-12.23
<i>Avena sativa</i>	5.5 a 7.5	Cualquier textura, pref. Arcillo-limoso, franco-arcilloso, limoso	4	28	37	600	850	1300	1000	1500-2000	3450	0-15.63
<i>Zea mays</i>	6 a 7	Franca-Limosa, Franca Arcillo-limosa, franco-arcilloso	9	25	35	600	900	1200	0	1200-1500	3300	0-10
<i>Vicia faba</i>	5 a 7	Franco, Franco arenoso	-4	18	22	500	650	1000	2800	3100	3400	0-12

Fuente: Elaboración propia con base a datos de CONAFOR (2006) y Aragón (2003)

2.2.3.1. Obtención de los mapas de criterios

Como señala Malczewski (1999), los mapas de criterios en un SIG son todas aquellas coberturas que representan los criterios de evaluación, es decir, los atributos que se asocian con los objetivos. Para el caso de la evaluación del nivel de adecuación del parque nacional, se consideraron los requerimientos básicos edáficos, climáticos y fisiográficos, para obtener un conjunto de mapas de criterios. Se aplicó el procedimiento de normalización frecuentemente utilizado en Idrisi, es decir, en la escala 0-255, tal como lo recomienda Eastman (1995). En esta escala, el grado máximo de adecuación tiene un valor de 255, y el grado nulo de adecuación, es de 0.

2.2.3.2. Obtención de mapas de restricción

Un aspecto a considerar en cualquier análisis espacial es la presencia de zonas donde no es posible llevar a cabo la actividad propuesta. En estos casos, el procedimiento básico consiste en considerar mapas de restricciones. Para efectos de la investigación se consideraron restricciones en términos de textura, uso de suelo y altitud. En el primer caso se consideró que algunas especies no podían desarrollarse en suelos areno-francos y, por consiguiente, debían ser excluidas de los mapas de nivel de adecuación correspondientes a: *Pinus ayacahuite*, *Quercus laurina*, *Zea mays*, *Solanum tuberosum* y *Vicia faba*. En el caso del uso de suelo, se consideró que algunas especies forestales no se desarrollan a grandes altitudes, en eriales y eriales asociados con pastizal alpino. Por otro lado, la restricción para especies agrícolas incluyó no solamente las zonas más elevadas y desprovistas de vegetación sino aquellas regiones actualmente ocupadas por vegetación natural, particularmente bosques. En lo que respecta a la altitud se consideró como restricción toda altitud mayor al límite superior de la tabla de requerimientos de cada una de las especies seleccionadas.

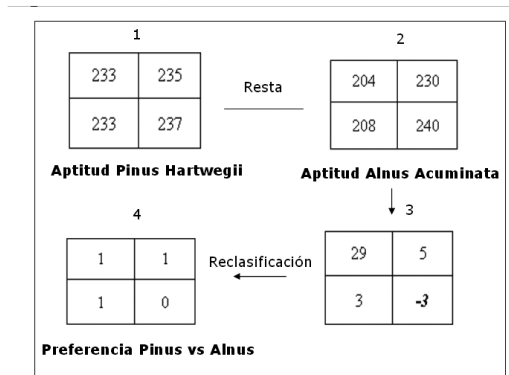
Una vez obtenidas las coberturas de restricciones, fueron multiplicadas a los mapas de nivel de adecuación por especie previamente obtenidos de tal manera que el mapa resultante excluyera aquellas áreas determinadas donde no es posible desarrollar la especie.

2.2.3.3. Obtención de la distribución forestal más adecuada

Entendiendo que el área ocupada por el PNNT tiene una vocación eminentemente forestal, y sabiendo que ha sufrido diversos procesos

antrópicos a lo largo del tiempo que le dan su actual configuración en cuanto a la ocupación del suelo, después de haber obtenido el nivel de adecuación de cada una de las especies, se procedió al análisis para determinar la distribución ideal de las zonas boscosas. La superposición sustractiva de coberturas de adecuación por especie permitió determinar las especies con mayores niveles de adecuación (Figura 2).

Figura 2. Proceso de superposición sustractiva de los mapas de aptitud por especie



Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la figura, los valores positivos fueron reclasificados dándole un valor de 1 y los negativos con un valor de 0, pues sólo se quiere conocer en qué zonas la especie 1 es más apta que la especie 2.

2.2.3.4. Obtención de la distribución agrícola sugerida

Habiendo obtenido la distribución forestal ideal, hay una consideración que no se podía pasar por alto: el hecho de que dentro del uso actual del parque nacional existe un área agrícola considerable, la cual es la fuente de subsistencia de la población local. Por ello el proponer una reconversión a usos forestales resultaba inviable. Como en el caso de las especies forestales, se jerarquizaron las 4 especies agrícolas según su importancia económica: 1) Papa; 2) Avena; 3) Maíz y 4) Haba. Basado en este orden se realizó la sustracción de imágenes de adecuación por especie

y se elaboró el mapa general de aptitud agrícola, que puede servir como guía para la práctica de una agricultura en aquellas zonas que actualmente no tiene una cobertura forestal.

3.3. Resultados

La aplicación de los procedimientos de análisis previamente descritos permitió cumplir los objetivos para los que fue diseñado el sistema.

3.3.1. Análisis del cambio de uso de suelo y vegetación

La tabulación cruzada entre las coberturas de 1972 y 2000 arrojó 67 categorías distintas de la leyenda. Con la finalidad de facilitar el análisis, se realizó el estudio por separado las transiciones sufridas por cada especie forestal (pino, abeto y latifoliadas -descartando el Cedro que se introdujo hace varias décadas en el parque nacional como resultado de acciones de reforestación-). El proceso incluyó la obtención de la matriz de transición (Cuadro 5).

Los bosques de oyamel tienden a distribuirse en las zonas relativamente bajas del parque nacional, en particular en la región noreste del parque y en las laderas del suroeste del área protegida. Se detectaron 18 tipos de transición relacionados con las diferentes coberturas.

Los procesos de cambio en el bosque de pino tienden a presentarse en las partes más elevadas, en particular en torno al cráter del volcán Nevado de Toluca. Si bien es cierto que, a lo largo de casi 40 años, se presentaron algunos procesos de recuperación del bosque, la mayor parte de las transiciones fueron hacia el deterioro. Así, las principales afectaciones se dieron en la pérdida de densidad de bosques densos y semidensos, que, en términos generales, superaron las 8 mil ha. Se trata, en definitiva, del tipo de bosque con mayor superficie deteriorada en el Parque Nacional. En cuanto a las latifoliadas, se conoce que son especies vegetales mucho más localizadas en las partes bajas del área natural protegida, en particular en las laderas oriental y nororiental del volcán.

Cuadro 5. Matriz de transición

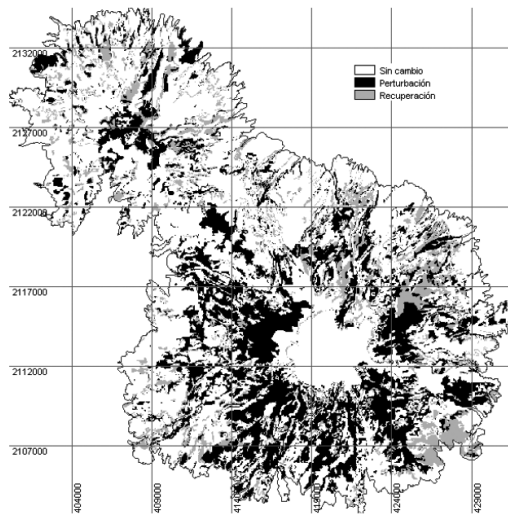
	2000													Pérdida de superficie en la cobertura original		
	Agrícola	Oyamel denso	Oyamel semidenso	Oyamel fragmentado	Cedro denso	Cedro semidenso	Cedro fragmentado	Pino denso	Pino semidenso	Pino fragmentado	Latifoliadas denso	Latifoliadas semidenso	Latifoliadas fragmentado		Otros usos	Área
1972	6192.92	216.78	157.64	85.44	45.28	28.12	21.12	36.44	47.80	34.16	121.88	98.32	60.80	1199.64	8346.34	2153.42
	93.92	10954.92	1139.92	790.96	0.00	2.28	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	319.32	13301.44	2346.52
	22.44	715.52	127.44	195.64	0.00	24.36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	13.32	1098.72	971.28
	14.16	502.32	167.64	133.96	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	230.20	1048.28	914.32
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	202.20	0.00	0.00	0.00	34.44	0.00	3.56	6493.60	3749.76	2268.88	0.00	0.00	0.00	526.80	13279.24	6785.64
	166.40	0.00	0.00	0.00	0.12	12.76	0.00	741.00	1252.52	1241.44	0.00	0.00	0.00	261.84	3676.08	2423.56
	293.12	0.00	0.00	0.00	16.96	16.80	5.24	323.44	369.08	921.32	0.00	0.00	0.00	393.04	2339.00	1417.68
	53.60	0.00	0.00	0.00	5.92	0.40	0.40	0.00	0.00	0.00	426.84	244.48	82.32	45.68	859.64	432.80
	48.80	0.00	0.00	0.00	23.28	2.52	4.48	0.00	0.00	0.00	290.56	424.40	224.04	157.04	1175.12	750.72
	69.52	0.00	0.00	0.00	3.20	12.80	1.60	0.00	0.00	0.00	162.76	99.00	82.16	88.08	519.12	436.96
	866.08	650.68	183.72	141.64	11.72	18.76	1.04	220.04	248.16	225.68	58.48	97.04	125.60	4179.64	7028.28	2848.64
Incremento de superficie en otras coberturas de 1972	1830.24	2085.30	1648.92	1213.68	140.92	118.80	37.56	1320.92	4414.80	3770.16	633.68	538.84	492.76	3234.96	52671.26	

Fuente: Elaboración propia

3.3.2. Análisis de recuperación-deterioro forestal

Se obtuvieron cuatro mapas, tres de los cuales correspondieron a la dinámica de perturbación-recuperación de cada especie forestal, y uno a la perturbación-recuperación general de los bosques en el parque nacional. La Figura 3 permite observar la distribución general de las zonas boscosas que sufrieron perturbación o recuperación en diverso grado. La dinámica general de dichos cambios se aprecia en la Cuadro 6. Es evidente que existe un franco proceso de perturbación que supera con mucho las cifras generales de recuperación forestal. De acuerdo con los datos expresados en dicho cuadro, la dinámica de perturbación-recuperación para oyamel presenta un relativo equilibrio. Las coberturas de pino, sin embargo, muestran mayores grados de perturbación. De las más de 13 mil hectáreas perturbadas, poco más de 10 mil corresponden a este tipo de bosque. Finalmente, para el caso de bosques de latifoliadas (principalmente aile) se presenta un cierto estado de equilibrio entre la recuperación y la pérdida sufrida.

Figura 3. Dinámica general de perturbación-recuperación



Fuente: Elaboración propia

Cuadro 6. Dinámica general de perturbación-recuperación

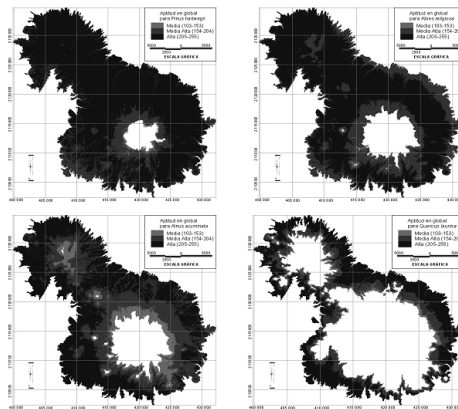
PERTURBACIÓN-RECUPERACIÓN FORESTAL (HA)	OYAMEL	PINO	LATIFOLIADAS	TODAS LAS ESPECIES
Perturbación grave	413,24	729	109	1 241,52
Perturbación fuerte	826,72	3 053,96	288,16	4 173,44
Perturbación moderada	1 579,92	6 265,72	626,12	8 478,40
Total	2 819,88	10 048,68	1 023,28	13 893,36
Recuperación alta	867,44	259,48	180,36	1 364,28
Recuperación media	843,68	703,76	358,12	1 972,60
Recuperación baja	1 110,24	1 481,92	575,96	3 243,28
Total	2 821,36	2 445,16	1 114,44	6 580,16
Balance				
Recuperación-perturbación	1,48	-7 603,52	-908,82	731,320

Fuente: Elaboración propia

3.3.3. Análisis del nivel de adecuación territorial

La aplicación de la metodología previamente descrita permitió obtener los mapas del nivel de adecuación del territorio para seis especies forestales y cuatro especies agrícolas. En la figura 4 se presentan las distribuciones de los niveles de adecuación por especie forestal.

Figura 4. Niveles de adecuación territorial para las principales especies forestales



Fuente: Elaboración propia

Para el *Pinus hartwegii*, el nivel de adecuación oscila entre los 107 y los 253. Como es posible apreciar en la Figura 3, la mayor parte del territorio del parque nacional presenta niveles altos de adecuación para ésta especie.

En el caso del *Abies religiosa*, el nivel de adecuación oscila entre 130 y alcanza el máximo posible (255). Al igual que en el caso anterior, la mayor parte del parque tiene un nivel de adecuación alto. Sin embargo, la altitud es evidentemente una importante limitante (Figura 4).

El *Pinus montezumae* presenta un nivel de adecuación variable, los valores oscilan entre 91 y 255. Teniendo en cuenta que ésta especie tiene una clara limitación de establecimiento en altitud (hasta los 3150 msnm), la mayor parte de las zonas en la que es factible su introducción tiene un nivel de adecuación de media a media alta.

Para *Pinus ayacahuite*, los valores oscilan entre los 80 hasta los 184. Teniendo en cuenta que ésta especie tiene una marcada limitación de establecimiento en altitud (hasta los 3250 msnm), en la mayor parte del territorio, en el que es viable, se tiene un nivel de adecuación de media a media alta.

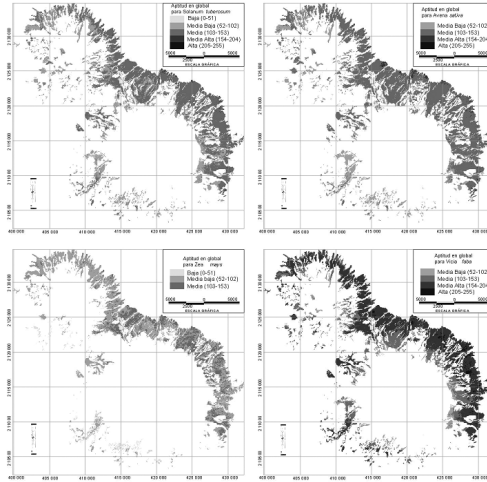
En lo que respecta al *Alnus acuminata* los valores de adecuación oscilan entre los 82 y alcanzando los 255. Como es posible ver en la Figura 4, en la mayor parte del territorio de estudio se tiene un nivel de adecuación entre medio alto y alto, limitándose en altitud conforme ésta aumenta.

La adecuación para el *Quercus laurina* oscila entre 104 y 251. Se observa en la mayor parte del territorio de estudio viable cuenta también con un nivel de adecuación entre medio alto y alto, pero con una limitación en altitud más marcada.

Para las especies agrícolas, se observó que el territorio poseía niveles de aptitud mucho más bajos que para el caso de las especies forestales. Se presentan los resultados más significativos (Figura 5)

Para *Solanum tuberosum*, el nivel de adecuación es mucho menor que lo reportado para las especies forestales. Los valores oscilan entre los 31 y los 163. Se observa que en la mayor parte del territorio de estudio viable se tiene un nivel de adecuación entre medio y medio bajo, pero con una limitación en altitud marcada.

Figura 5. Niveles de adecuación territorial para las especies agrícolas



Fuente: Elaboración propia

La adecuación para *Avena sativa* es también, en términos generales, mucho menor que lo reportado para las especies forestales. Los valores oscilan entre los 54 y los 162, por lo que en cuanto a la adecuación global, tienen una aptitud tendiente a media.

Para *Zea mays*, el nivel de adecuación es también, en términos generales, mucho menor que lo reportado para las especies forestales. Los valores oscilan entre los 22 y los 141, por lo que tiene una adecuación tendiente a media baja.

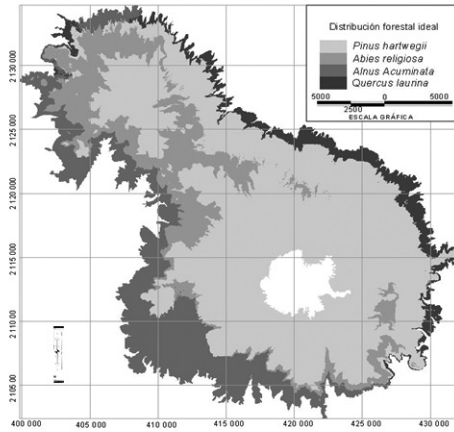
Para *Vicia faba*, el nivel de adecuación es, en términos generales, mucho mayor que lo reportado para las otras tres especies agrícolas analizadas. Los valores oscilan entre los 71 y los 218, con tendencia de media a media alta, por lo que su establecimiento dentro del Parque Nacional parecería factible.

3.3.4. Determinación de la distribución más adecuada de especies forestales

Teniendo la evidencia gráfica que la vocación del área de estudio es eminentemente forestal y considerando que en el análisis de dominancia

las especies agrícolas tienden a desaparecer, la tarea siguiente fue la de determinar en qué áreas del parque nacional tiene una mejor aptitud territorial cada una de las cuatro principales especies forestales (*Pinus hartwegii*, *Abies religiosa*, *Alnus acuminata* y *Quercus laurina*). Esto permitió, por añadidura, obtener como resultado un mapa de distribución forestal ideal según sus características climáticas, fisiográficas y edáficas (Figura 6).

Figura 6. Distribución forestal ideal



Fuente: Elaboración propia

Como puede apreciarse, la configuración que debería tener el área de estudio sería de *Pinus hartwegii* en mayor proporción, cubriendo 30343.92 hectáreas, *Abies religiosa* hacia la parte noroeste, con 8697.08 hectáreas, *Alnus acuminata* hacia el noroeste, con 9347.57 hectáreas y finalmente *Quercus laurina* hacia el este del parque nacional, cubriendo 3355.38 hectáreas.

4. Conclusiones

El Idrisi constituye una poderosa herramienta para el monitoreo y análisis de los problemas ambientales. Esto resulta de especial utilidad en el caso de la evaluación y manejo de las áreas naturales protegidas. Su estructura de datos simplifica el proceso de importación de información

geográfica de muy diversas fuentes y facilita la generación de las bases de datos. Así, en un ambiente muy amigable ha sido posible incorporar información digitalizada en ambiente CAD e importar datos provenientes de otras paqueterías. Pese a estas ventajas, es posible identificar ciertas limitaciones de sistema como el hecho que en el comentado proceso de cruce tabular no es posible procesar cartografía que cuente con más de 16 categorías, razón por la cual se tuvo que hacer un proceso de reclasificación para éste estudio.

En cuanto a los resultados encontrados, se puede observar que en el análisis de las transiciones de uso de suelo de 1972 a 2000, el área de estudio ha disminuido sensiblemente en su grado de conservación. En éste sentido, los cambios más significativos que se dieron fueron las más de 4000 hectáreas que pasaron de ser pino denso a pino semidenso y las más de 2500 hectáreas que pasaron de pino denso a pino semidenso, lo cual representa que se produjo una disminución superior al 40% del bosque denso de pino. Un aspecto relevante es que las zonas agrícolas han venido disminuyendo pero se han abierto zonas de pastoreo, lo cual indica una reconversión de las actividades primarias. En este contexto, la disminución del arbolado se explica por procesos de extracción intensiva y semi intensiva con fines comerciales, lo cual indica que los procesos de pérdida de densidad forestal son más marcados que los de pérdida absoluta del arbolado.

Respecto con el nivel de adecuación territorial para especies forestales y agrícolas, se encontró que, en lo que respecta al procedimiento desarrollado, el problema central fue la enorme complejidad resultante de evaluar el nivel de adecuación del territorio para diez especies, para lo cual el uso Idrisi como SIG de plataforma, representó la opción más adecuada debido a que éste software simplifica sensiblemente los procesos requeridos para éste trabajo de investigación sin sacrificar su precisión.

En lo concerniente a los resultados del análisis, es pertinente señalar que casi toda la región muestra el mayor nivel de adecuación para el desarrollo de los bosques de *Pinus hartwegii*. Esto resulta de especial relevancia dado que, como ha quedado demostrado en otros estudios, este tipo de bosque es el que se encuentra sujeto a los más intensos procesos de deforestación y deterioro (Franco *et al.*, 2006). *Abies religiosa* resultó la segunda especie forestal en cuanto al nivel de adecuación del territorio,

sin embargo, dadas sus características fenológicas, presenta ciertas restricciones en lo tocante a la altitud. En cuanto a las especies agrícolas, su aptitud territorial en el Parque Nacional Nevado de Toluca es baja y nunca por encima de la vocación forestal. Destaca, sin embargo, el nivel de adecuación territorial del Haba (*Vicia faba*), que en algunas zonas puede superar el nivel de adecuación para algunas especies de coníferas como *Pinus montezumae* y *Pinus ayacahuite*.

Este estudio permitió observar las potencialidades del software Idrisi como una opción realmente viable como herramienta de apoyo de análisis espacial, siempre y cuando se tenga un planteamiento bien definido que permita previsualizar los productos que han de obtenerse, sin embargo, la confiabilidad de los resultados depende directamente de la calidad de las bases de datos que han de ingresar a este esquema metodológico.

Por otra parte, este estudio tuvo como aporte el acercamiento del análisis de nivel de adecuación del territorio a las temáticas de distribución y potencialidad de establecimiento de especies forestales y agrícolas, siendo que éste procedimiento habitualmente es usado en temáticas de urbanización o distribución de residuos peligrosos. De la misma manera, el hecho de analizar los cambios de uso de suelo y vegetación no solamente de manera cuantitativa sino también en su distribución espacial, da un panorama más claro de la problemática del área de estudio que puede ser extrapolada hacia otras áreas naturales, y es en éste sentido que el Idrisi representa una de las opciones de procesamiento SIG más viables dado a la ya comentada simplificación de procesos que en otros programas implicaría un largo proceso secuencial de acciones intermedias.

Asimismo, se pudo observar que las aplicaciones que se manejaron para ésta trabajo en particular abordan solo una pequeña parte de las potencialidades que ofrece el uso de los SIG para análisis espacial, por lo que es materia pendiente la constante mejora de los procesos aquí mencionados en pro de resultados cada vez más confiables.

Desde luego existieron algunos inconvenientes a tomar en cuenta para estudios posteriores como lo son las técnicas de fotointerpretación utilizadas que supusieron una importante inversión de tiempo y que podría ser sustituida por técnicas de tratamiento digital de imágenes satelitales. De la misma manera, es indispensable mejorar la calidad y confiabilidad de los mapas relacionados con aspectos climáticos y edáficos, debido a que su

grado de generalidad pudo haber sesgado de alguna manera los resultados obtenidos cuando fueron utilizados para procesamiento. Igualmente queda claro que es factible mejorar la secuencia metodológica seguida, y eso se dará eventualmente con una mejor capacitación técnica y analítica hacia las temáticas aquí expuestas. Así, se espera seguir evolucionando en el análisis espacial del área de estudio con la finalidad de obtener resultados cada vez más precisos, contundentes, y que sean realmente funcionales para lograr una verdadera integración del conocimiento en pro de la conservación de ésta área natural protegida.

5. Bibliográficas

- Aragón, L. (2003). *Factibilidades agrícolas y forestales en la República Mexicana*. México, Trillas. 196 pp.
- Bocco, G., M. Mendoza, y O. Masera (2001). “La dinámica del Cambio de Uso de Suelo en Michoacán”. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación. En: *Boletín del Instituto de Geografía*, UNAM. Núm.44, pp. 18-38.
- Conafor (2006). “Fichas técnicas para la reforestación”. Comisión Nacional Forestal. En <http://www.conafor.gob.mx/>
- Dirzo, R. y O. Masera, (1996). *Clasificación y Dinámica de la Vegetación en México*. Centro de Ecología, UNAM 56 pp.
- Eastman, J. R. (1995) *Idrisi for Windows, user's guide version 1.0*. Clark University. Worcester Mass. 485 pp.
- Franco, S. y Regil, H. H. (2005). Evaluación edafológico-climática para la introducción de frutales perennes y pastos retenedores de suelo en el Parque Nacional Nevado de Toluca. Informe técnico del proyecto. ICAMEX. 35 pp.
- Franco, S., Regil, H.H, González, C. y Nava, G. (2006). Cambio de uso del suelo y vegetación en el Parque Nacional Nevado de Toluca, México, en el periodo 1972-2000. En: *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, UNAM, Núm. 61. pp. 38-57.
- Gómez, D. (1992). Evaluación de impacto ambiental. Madrid. Ed. Agrícola Española. 385 pp.
- Luque, A. (2003). La evaluación del medio para la práctica de actividades turístico-deportivas en la naturaleza. En: *Cuaderno de turismo*. No. 12. pp. 131-149.

- Malczewski, J. (1999). *GIS and multicriteria decision analysis*. Ed. John Wiley & sons Inc. 388 pp.
- Ordóñez, C. y Martínez, A. (2003). Sistemas de Información Geográfica: Aplicaciones prácticas con Idrisi32 al análisis de riesgos naturales y problemáticas medioambientales. Alfaomega-Ra-Ma. España. 224 pp.
- Ramírez, I. (2001). Cambios en las Cubiertas del Suelo en la Sierra de Angangueo, Michoacán y Estado de México, 1971-1994-2000. En *Boletín del Instituto de Geografía*, UNAM. Núm. 45. pp. 39-55.
- Sánchez, A. y Morte, A. (1992). Aplicación de un Sistema de Información Geográfica en un estudio de acogida del territorio. En: *Investigaciones geográficas*. No. 10. pp. 215-225.
- SAG. (1970). Código Forestal Subsecretaría Forestal y de la fauna. Departamento de divulgación: 968 pp.
- Santé, I. y Crecente, R. (2005). "Evaluación de métodos para la obtención de mapas continuos de aptitud para usos agroforestales". En: *Geo Focus*, No.5. pp. 40-68.
- Verstappen, H. (1977). *The use of Aerial Photographs in Geomorphological Mapping*. ITC Text Book VII-5, Enschede, The Netherlands: 177 pp.