
**Análisis multitemporal
de la degradación ambiental
de la Cuenca del Río Necaxa,
Puebla, México**

**Gustavo Manuel Cruz Bello
y col.**

Ayudas a la investigación 2011

Investigador Principal

Gustavo Manuel Cruz Bello

Centro de Investigación en Geografía y Geomática "Ing. Jorge L. Tamayo"
A.C., México

Equipo Investigador

Felipe Omar Tapia Silva

Antonio Z. Márquez García

Margarito Tapia García

Departamento de Hidrobiología, Universidad Autónoma Metropolitana
Campus Iztapalapa, México

José Mauricio Galena Pizaña

Colegio de Geografía,
Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), México

Índice

	Página
1. RESUMEN	4
PALABRAS CLAVE	4
2. INTRODUCCIÓN	4
3. OBJETO Y ALCANCE	4
3.1. Objetivo General	4
4. MATERIALES Y METODOLOGÍA	5
4.1. Área de estudio	5
4.2. Análisis del cambio de la cobertura del terreno	5
4.3. Modelado de pérdida de suelo	6
4.4. Determinación de sólidos sedimentables	8
5. RESULTADOS	8
5.1. Cambio de la cobertura del terreno	8
5.2. Pérdida de suelo	9
5.3. Sólidos sedimentables	11
6. DISCUSIÓN	11
7. CONCLUSIONES	11
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	12
9. ANEXOS	13

1. RESUMEN

Las actividades humanas determinan el uso del suelo de una región y éste a su vez afecta a diversas funciones ecológicas. Esto ha sido particularmente bien estudiado en el caso de los procesos hidrológicos. En este sentido el objetivo de esta investigación fue encontrar la relación entre los procesos de pérdida de la cobertura forestal y la erosión de los suelos en diferentes tiempos. Y al mismo tiempo delinear de forma preliminar las relaciones de estos procesos con el grado de turbidez en los embalses de la Cuenca del Río Necaxa, México. El análisis del cambio de cobertura del suelo se realizó a través de la clasificación supervisada de imágenes de satélite SPOT4 de los años 2000, 2005 y 2012. Para estimar la erosión se empleó la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE por sus siglas en inglés). El análisis de los sólidos sedimentables se efectuó mediante muestras colectadas en los cuerpos de agua por medio de una botella Van Dorn. Las muestras fueron analizadas en el laboratorio para determinar los sólidos sedimentables por el método del Cono Imhoff.

La tendencia en los 12 años analizados fue a perder zonas de bosque, con un aumento en las áreas de Agricultura y los Poblados. Es precisamente en estas áreas con pérdida de bosques donde se predice una mayor erosión dentro de la cuenca. Esto se explica pues se ha removido la capa vegetal que protege al suelo tanto de perder su estructura por el impacto de las gotas de lluvia como por su arrastre provocado por los escurrimientos. Se encontró escasa presencia de sólidos sedimentables e inclusive nula repartida de forma homogénea en todo el lago, lo que dificultó su correlación con la información proveniente de las imágenes de satélite. De estos hallazgos se puede determinar una relación causa-efecto donde a partir del proceso de cambio de uso del suelo se incrementa la erosión del suelo, sobre todo en áreas sin cobertura vegetal. Y que esto a su vez puede tener un impacto sobre la calidad del agua de los embalses al fomentar el incremento en los sólidos sedimentables. Para concluir podemos aseverar que un mejor conocimiento de estas interrelaciones permitirá un manejo más adecuado de los recursos naturales en la región. En esa dirección el presente estudio establece la línea base para monitorear en el largo plazo las relaciones entre la modificación de la cobertura del terreno, la pérdida de suelo y el incremento de los sólidos sedimentables en los cuerpos de agua.

Palabras clave

Percepción remota, cambio de uso del suelo, erosión, sólidos suspendidos, cuerpos de agua.

2. INTRODUCCIÓN

Considerando que los componentes de un ecosistema están conectados unos con otros [1], el análisis de la contaminación de los cuerpos de agua tiene que abordarse desde un

enfoque integral. Bajo este enfoque uno de los principales factores que determinan la calidad del agua en embalses, lagos y ríos es la cobertura del terreno y las actividades que se desarrollan en los alrededores. La cobertura del terreno juega un papel fundamental en la regulación del ciclo hidrológico. En general se ha encontrado que la cobertura arbórea permite mayor infiltración y recarga además de que reduce la energía con la que las gotas de lluvia impactan el suelo al ser estas interceptadas por el dosel con lo cual se minimiza la destrucción de la estructura del suelo [2, 3].

Uno de los principales efectos de la pérdida de cobertura natural en el ciclo hidrológico es el incremento en la escorrentía y la erosión del suelo. Para evaluar estos impactos se han usado diferentes métodos que incluyen mediciones en campo, la utilización de modelos y el uso de los sensores remotos [4]. Uno de los efectos directos de la erosión es el depósito de sedimentos en los cuerpos de agua. La concentración de sedimentos puede tener efectos en la salud humana de las regiones bajas de la cuencas si los sedimentos llevan metales pesados. Otro problema que conlleva la sedimentación es el azolve de las presas y canales, así como los efectos adversos a la productividad.

Asimismo, los valores altos de los parámetros de calidad del agua: clorofila a, turbidez, sólidos suspendidos totales y nutrientes son sintomáticos de condiciones de eutrofización, la cual tiene impactos negativos sobre la biota acuática [5].

La evaluación multitemporal de los procesos de cambio de cobertura y las modificaciones a los procesos hidrológicos no son, en la mayoría de los casos, efectuados de forma sistemática debido a la carencia de recursos destinados para tal fin y a la falta de políticas ambientales.

Sin embargo, en los planes de conservación y manejo de cuencas se deben considerar las relaciones causa efecto que las actividades y procesos de transformación de la cobertura vegetal tienen sobre los procesos hidrológicos y en la calidad del agua en embalses y ríos. Una de las herramientas que facilita este tipo de evaluaciones multi-temporales es la percepción remota. Específicamente el uso de imágenes de satélite facilita la evaluación a nivel regional tanto del cambio de cobertura del terreno y los procesos erosivos asociados como de la calidad del agua de los embalses, lagos y ríos. Para los manejadores de los recursos hídricos es una gran ventaja que mediante técnicas de percepción remota se puedan detectar condiciones de turbidez y eutrofización en diferentes sitios sin tener que realizar mediciones en campo, las cuales son caras y demandantes en tiempo [5, 6]. Lo que limita la posibilidad de realizar una monitoreo continuo de la calidad del agua en lagos y ríos.

3. OBJETO Y ALCANCE

3.1. Objetivo General

Este trabajo tiene como objetivo encontrar la relación entre los procesos degradación de la cobertura forestal

y deforestación sobre la estabilidad de los suelos y la erosión de los mismos en diferentes tiempos y delinear relaciones preliminares con el grado de turbidez en los embalses de la Cuenca del Río Necaxa.

4. MATERIALES Y METODOLOGÍA

4.1. Área de estudio

El área de estudio se encuentra ubicada en la Cuenca Hidrográfica del Río Necaxa, que está incluida dentro del sistema de áreas naturales protegidas de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas con una categoría de manejo de Área de Protección de Recursos Naturales. Está ubicada en la Planicie Costera del Golfo de México (figura 1). La cuenca tiene una superficie de 39,557 ha con una población de 126,138 habitantes. Es una región con gran riqueza florística y faunística por lo que ha sido designada como sitio de la Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional especialmente como Hábitat de Aves Acuáticas (Ramsar).

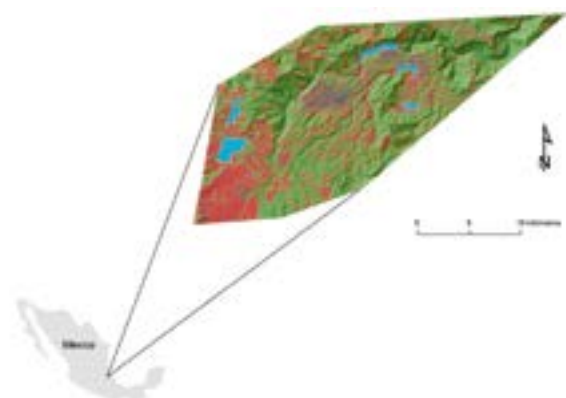


Figura 1. Área de estudio. Cuenca Hidrográfica del Río Necaxa.

4.2. Análisis del cambio de la cobertura del terreno

Para realizar la evaluación del cambio de uso del suelo se emplearon imágenes de satélite SPOT de los años 2000, 2005 y 2012.

Antes de realizar la clasificación de las imágenes se llevó a cabo su pre-procesamiento. Esto es necesario ya que en el paso de la energía desde el objeto hasta el sensor existen diversos factores que alteran la transmisión. Entre estos se encuentran los gases presentes en la atmósfera así como el relieve del terreno. La atmósfera tiene un impacto directo sobre la radiancia original proveniente de un objeto en la superficie terrestre, que se le conoce como dispersión de flujo [7]. Por su parte el relieve modifica las condiciones de iluminación debido a las diferencias en pendiente y orientación del terreno lo que produce diferentes respuestas espectrales de un mismo objeto [8].

En la corrección radiométrica se transforman los números digitales (DN) de la imagen a valores de reflectan-

cia. Para esto se empleó la información del Bias y Gain del sensor y otros coeficientes de calibración. El proceso se llevó a cabo en dos pasos: el primero consistió en convertir los DN a radiación, y en el segundo se calculó la reflectancia planetaria. Para la transformación a reflectancia se empleó la siguiente fórmula:

$$DN = GL + B$$

Donde: DN = valores de números digitales registrados; G = pendiente de la función de respuesta (gain del canal); L = radiancia espectral medida (sobre el ancho de banda del canal); B = intercepción de la función de respuesta.

La reflectancia aparente relaciona la radiancia medida a la irradiancia solar incidente en la atmósfera y se expresa como una fracción decimal entre 0 y 1. Además, antes de la conversión de radiancia a reflectancia, se realiza una corrección del ángulo de elevación solar y usualmente ésta consiste en dividir cada valor de píxel de una escena por el seno del ángulo de elevación solar, eso se realiza para un tiempo y posición particular de la escena ya que depende de la estación del año en que fue tomada la imagen. La corrección es aplicada en términos del ángulo solar cenital (con respecto al cenital: línea que va del sensor a la tierra) el cual es igual a 90° menos el ángulo de inclinación en el píxel. En este caso el valor de cada píxel es dividido por el coseno del ángulo solar cenital, cabe mencionar que en este momento se ignoran los efectos topográficos y atmosféricos.

Para determinar la cobertura del terreno se realizó una clasificación supervisada. La primera fase de la clasificación correspondió a la colecta de campos de entrenamiento es decir polígonos o rodales puros de un tipo de cobertura del terreno (sin mezcla con otras coberturas). Los campos de entrenamiento tuvieron un área mínima de 1,600 m² (correspondiendo a cuatro píxeles) y estuvieron ubicados en diferentes exposiciones (N, S, E, O) para garantizar que se capturará toda la variabilidad dentro de las clases. Para 2000 y 2005 se obtuvieron a partir de fotografía aérea e imágenes de alta resolución Quick Bird respectivamente, para 2012 se realizaron recorridos de campo con la ayuda de navegadores GPS (ver Anexo 1. Tipos de Bosque). Las clases de cobertura del terreno consideradas son: Bosque, Agricultura, Suelo Desnudo, Poblados y Cuerpos de Agua.

Para la clasificación se usó la técnica de Máxima Probabilidad, que es una de las más usadas en percepción remota. Esta técnica supone que las estadísticas de cada clase en cada banda tienen una distribución normal y calcula la probabilidad de que un cierto píxel pertenezca a una clase específica. Cada píxel es asignado a la clase a la que tiene la máxima probabilidad de pertenecer. La información de los campos de entrenamiento se usa para calcular la media y la varianza de cada clase que son usadas a su vez para estimar esta probabilidad.

Para la verificación de la exactitud de la clasificación se realizó un muestreo aleatorio estratificado donde cada estrato correspondió a una cobertura del terreno clasificada. Para 2000 y 2005 los sitios de verificación se ubica-

ron en las fotografías aéreas y las imágenes Quick Bird respectivamente. Para el 2012 los sitios seleccionados se visitaron en campo con el apoyo de navegadores GPS. Con estos datos se generó, para cada fecha, una matriz de confusión y se realizó el análisis estadístico Kappa que produce el estadístico Khat que mide la concordancia entre la clasificación de las imágenes de satélite con los datos medidos en campo. Valores de este estadístico mayores a 0.8 indican una elevada concordancia entre la clasificación y los datos observados, valores entre 0.8 y 0.4 se consideran como una concordancia media, mientras que valores menores a 0.4 dan una concordancia baja que puede ser explicada por el azar [9].

4.3. Modelado de pérdida de suelo

Para estimar la erosión en el área de estudio se empleó la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE, por sus siglas en inglés) considerando aportes metodológicos generales y estudios particulares para México [10-14].

Esta ecuación ha sido ampliamente usada a nivel mundial. Fue generada por el Departamento de Agricultura de los EUA [10] y se basa en relaciones empíricas medidas en campos agrícolas, sin embargo diversos autores han contribuido para ampliar su aplicabilidad a diferentes ambientes.

La USLE estima la pérdida de suelo por unidad de superficie (ton/ha) y se basa en seis factores que controlan la erosión: Erosividad de la lluvia; Resistencia del suelo a la erosión; Longitud de la pendiente; Grado de la pendiente; Cubierta vegetal y Prácticas de conservación de suelos.

La erosividad de la lluvia se mide en $mj\ mm/ha\ hr$ y esta definida como el potencial de la lluvia para causar erosión. Para estimarla se han desarrollado diferentes índices, entre ellos: EI30, $KE > 25$, Alm, Ram y Fournier [15-19].

Sin embargo, debido al reducido número y baja confiabilidad de los datos de las estaciones climatológicas Cortés [20] generó ecuaciones de regresión para 14 regiones de México donde se estima el índice EI30 anual ($MJ\ mm/ha\ hr$) a partir de la precipitación media anual (mm)

Para el caso específico del área de estudio la ecuación empleada fue:

$Y = 7.0458$ (precipitación anual) - 0.002096 (precipitación anual)², que tuvo un coeficiente de correlación de 0.97. La capa de la precipitación media anual se obtuvo a partir de la interpolación de los datos de las estaciones climatológicas del Sistema Meteorológico Nacional.

La resistencia del suelo a la erosión; se puede estimar al medir la pérdida de suelo directamente en campo, sin embargo esto es tardado y costoso. Una alternativa es el uso de elementos del suelo de fácil medición como son el contenido de arena, limo y arcilla, el contenido de materia orgánica, la presencia de óxidos de fierro y aluminio, la estructura, la humedad y la permeabilidad.

Otra alternativa aun más sencilla para estimar la resistencia del suelo a erosión, que es la empleada en este

proyecto, es la propuesta por la FAO [11], que se basa en los datos de textura superficial y de unidad del suelo (según el propio sistema de clasificación de la FAO). Los valores de resistencia a la erosión que corresponden a cada combinación de Unidad de suelo y Textura presentes en el área de estudio se muestran a continuación:

Unidad de suelo	Textura	Resistencia del suelo a la erosión
Acrisol húmico	media	0.03
Andosol húmico	media	0.02
Andosol ócrico	media	0.04
Cambisol húmico	finas	0.013
Feozem háplico	media	0.02
Fluvisol calcárico	gruesa	0.013
Litosol	finas	0.007
Litosol	media	0.02
Luvisol crómico	finas	0.013
Luvisol crómico	media	0.04
Luvisol órtico	media	0.04
Regosol calcárico	finas	0.007
Regosol dístrico	media	0.04
Regosol éútrico	media	0.04

Los datos de las unidades de suelo y las texturas se obtuvieron directamente de la cartografía edafológica de INEGI (que es la agencia oficial de estadística y geografía de México).

La longitud de la pendiente se define como "la distancia desde el punto de origen del escurrimiento superficial, al punto donde el grado de la pendiente decrece lo suficiente para que empiece el depósito, o que el escurrimiento entre en un canal bien definido, el cual puede ser parte de una red de drenaje natural, o un canal construido" [10].

La longitud de la pendiente se estima con la siguiente fórmula:

$$L = \left[\frac{\lambda}{22.1} \right]^m$$

Donde:

L = Factor longitud de la pendiente

λ = Longitud de la pendiente (metros)

m = Exponente regido por el porcentaje de la pendiente de acuerdo a los valores del siguiente cuadro [10]:

Valor del exponente	% de pendiente
0.5	> 5
0.4	3 - 5
0.3	2 - 3
0.2	1 - 2
0.1	< 1

El grado de la pendiente se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$S = \frac{0.43 + 0.30s + 0.0043s^2}{6.613}$$

Donde:

- S = grado de la pendiente
- s = Pendiente en %

La longitud y el grado de la pendiente se derivaron mediante algebra de mapas a partir del modelo de elevación digital de INEGI.

La cubierta vegetal tiene una importancia relevante en el cálculo de la pérdida de suelo ya que reduce el impacto directo de las gotas de lluvia y del efecto de los escurrimientos.

El factor de cubierta vegetal se derivó a partir de la clasificación de las imágenes de satélite SPOT de los años 2000, 2005 y 2012; a cada tipo de cobertura se le asignó un valor de acuerdo a lo reportado en la literatura especializada [10, 14, 21]:

Cubierta vegetal	Media anual del factor C
Suelo desnudo	1.0
Bosque	0.001
Agricultura	0.50
Pradera herbácea	0.01

Prácticas de conservación de suelos. Considerando el nivel regional del estudio y por tanto la falta de datos de las prácticas de conservación de suelos a nivel parcela se asumió el no uso de éstas, asignándose un valor de 1 para toda la región.

De cada uno de los seis factores se generó una capa digital que se integró al sistema de información geográfica (figura 2).

El modelo empleado tiene como supuesto que todos los factores que intervienen en el proceso de erosión se mantuvieron constantes durante el período de evaluación (2000 - 2012) a excepción de la cobertura del terreno que se determinó mediante técnicas de percepción remota. Cabe mencionar que este supuesto no está tan alejado de la realidad, pues en realidad el factor relativamente más fácilmente modificado por efectos antrópicos es la cobertura del terreno.

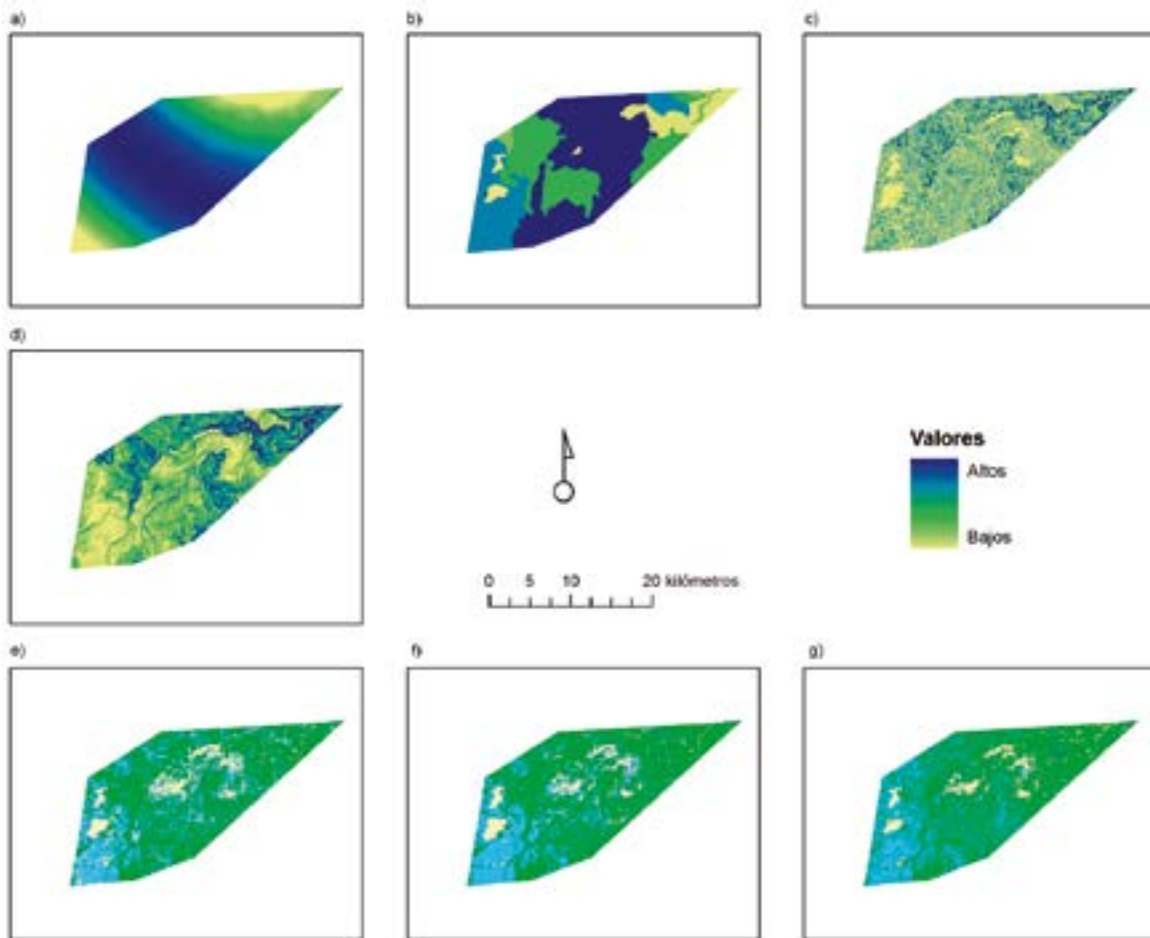


Figura 2. Capas digitales de los factores usados en la USLE: a) Erosividad de la lluvia; b) Resistencia del suelo a la erosión; c) Longitud de la pendiente; d) Grado de la pendiente; e) Cubierta vegetal 2000; f) Cubierta vegetal 2005; g) Cubierta vegetal 2012.

4.4. Determinación de sólidos sedimentables

La información de turbidez, que está directamente relacionada a los sólidos sedimentables, se adquirió de muestras de agua superficial tomadas directamente en los embalses por medio de una botella Van Dorn. Las muestras fueron analizadas en el laboratorio para determinar los sólidos sedimentables por el método del Cono Imhoff [22], asimismo se determinó el porcentaje de materia orgánica e inorgánica de estos sólidos utilizando un microscopio estereoscópico. Para poder descartar efectos acumulativos se consideró necesario sólo tomar muestras de agua en el Lago Nexapa, que es el que no tiene descargas de otros lagos lo cual puede enmascarar el efecto del cambio de uso del suelo sobre los sólidos sedimentables. Los resultados de sólidos sedimentables se correlacionaron con la respuesta espectral de los cuerpos de agua en las imágenes SPOT del 2012 [5].

5. RESULTADOS

5.1. Cambio de la cobertura del terreno

De la clasificación supervisada se obtuvo que para el año 2000 la cobertura que ocupaba la mayor superficie era el Bosque con casi un 70% del área de estudio, seguido por la Agricultura con alrededor de una tercera parte, mientras que los Poblados ocupan el tres por ciento, el Suelo Desnudo el uno por ciento y los Cuerpos de Agua el dos por ciento del área de estudio (figura 3; tabla 1).

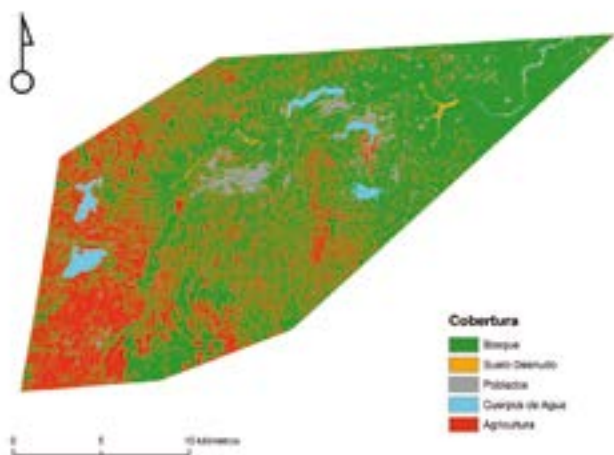


Figura 3. Uso del suelo 2000.

La exactitud total de la clasificación fue de 81%, del análisis Kappa se obtuvo un valor de 1 para el estadístico Khat, es decir una elevada concordancia entre la clasificación y los puntos de verificación.

Los errores más altos de omisión se dieron en el suelo desnudo y de comisión se presentaron en la agricultura (tabla 2).

Tabla 2. Errores de omisión y comisión, clasificación 2000.

Error de omisión		Error de comisión	
Bosque	0%	Bosque	13%
Suelo Desnudo	60%	Suelo Desnudo	0%
Poblados	33%	Poblados	20%
Cuerpos de Agua	50%	Cuerpos de Agua	0%
Agricultura	0%	Agricultura	50%

Para 2005 la cobertura del terreno fue muy similar que la del año 2000 para el Bosque y el Suelo Desnudo cubriendo el mismo porcentaje que la fecha previa. Las modificaciones en la cobertura se dieron en los Poblados que se incrementaron a cuatro por ciento, los Cuerpos de Agua que pasaron a tres por ciento y la Agricultura que disminuyó en dos por ciento en el periodo 2000-2005 (figura 4; tabla 1).

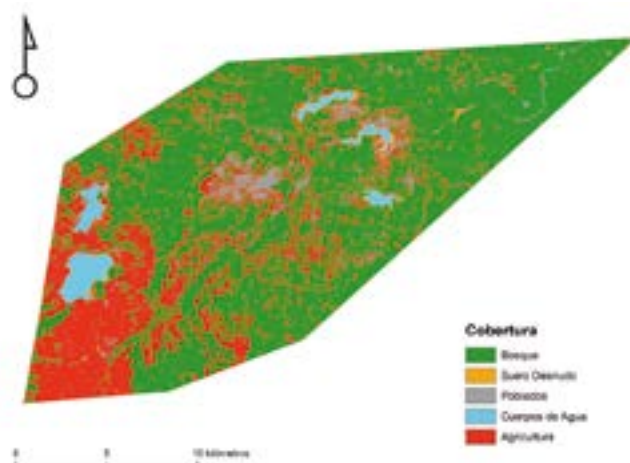


Figura 4. Uso del suelo 2005.

Tabla 1. Cobertura del terreno en la cuenca del Río Necaxa, Puebla (2000, 2005 y 2012).

	Área (ha)	%	Área (ha)	%	Área (ha)	%
	2000		2005		2012	
Bosque	24,467	67	24,503	67	22,539	62
Suelo Desnudo	331	1	362	1	299	1
Poblados	1,128	3	1,357	4	2,604	7
Cuerpos de Agua	800	2	1,074	3	985	3
Agricultura	9,876	27	9,308	25	10,176	28

La exactitud total de la clasificación fue de 76%, del Khat, es decir una elevada concordancia entre la clasificación y los puntos de verificación.

Los errores más altos de omisión y de comisión se dieron en el suelo desnudo (tabla 3).

Tabla 3. Errores de omisión y comisión, clasificación 2005.

Error de omisión		Error de comisión	
Bosque	14%	Bosque	10%
Suelo Desnudo	80%	Suelo Desnudo	67%
Poblados	33%	Poblados	33%
Cuerpos de Agua	10%	Cuerpos de Agua	10%
Agricultura	27%	Agricultura	43%

Con referencia al 2005 para 2012 las área de Bosque disminuyeron cinco puntos porcentuales, los Poblados incrementaron su superficie en tres por ciento al igual que la Agricultura que cubrió casi una tercera parte del área de estudio. Las zonas de Suelo Desnudo y los Cuerpos de Agua ocuparon la misma superficie que en le 2005, quedando en uno y tres por ciento respectivamente (figura 5; tabla 1).

La exactitud total de la clasificación fue de 76%, del análisis Kappa se obtuvo un valor de 1 para el estadístico Khat, es decir una elevada concordancia entre la clasificación y los puntos de verificación.

Los errores más altos de omisión y de comisión se dieron en el suelo desnudo aunque fueron menores que los encontrados para la clasificación del 2005 (tabla 4).

Tabla 4. Errores de omisión y comisión, clasificación 2012.

Error de omisión		Error de comisión	
Bosque	5%	Bosque	10%
Suelo Desnudo	33%	Suelo Desnudo	33%
Poblados	30%	Poblados	13%
Cuerpos de Agua	0%	Cuerpos de Agua	0%
Agricultura	20%	Agricultura	25%

Para entender el cambio de pérdida de suelo derivado de las transformaciones de la cobertura del terreno, se analizó la tendencia en estos 12 años que fue a perder áreas de Bosque, pasando de 67% en el año 2000 a 62% en el 2012. Los Poblados tuvieron un incremento de cuatro puntos porcentuales mientras que la Agricultura se incremento 1% en el mismo periodo. Un caso particularmente interesante es el de los Cuerpos de Agua, en particular de uno que para el año 2000 estaba lleno a menos de la mitad de los otros años (tabla 1; figura 6).

La distribución espacial indica que los Cuerpos de Agua de la región noreste del área de estudio están rodeados por un mayor porcentaje de bosque, mientras que los de la región oeste están más relacionados con la agricultura.

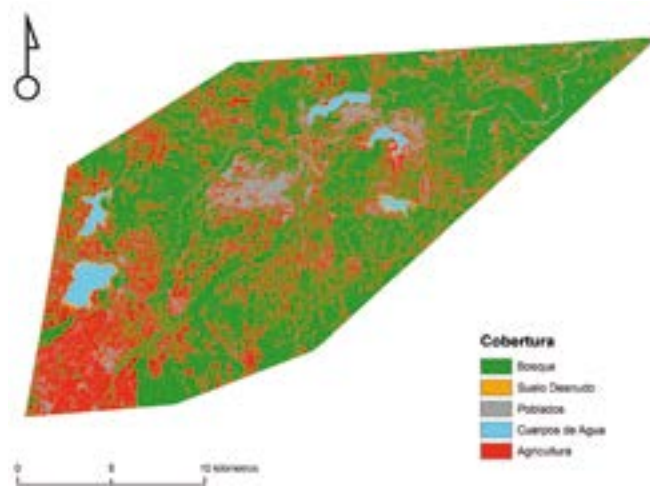


Figura 5. Uso del suelo 2012.

5.2. Pérdida de suelo

A partir de los datos de cambio de cobertura se estimó su impacto sobre la pérdida de suelo. Estos resultados se deben analizar y describir considerando que por el sellamiento del suelo con concreto o asfalto las áreas que se convierten en Poblados son consideradas con una contribución nula a la pérdida de suelo. Así, aparentemente no hay grandes modificaciones en los porcentajes de las áreas con diferente grado de erosión. Sin embargo, si conjuntamos las áreas con Alta y Muy Alta erosión con aquellas que se transformaron a Poblados usando como término para describir esta combinación como Zonas de Degradación, entonces tenemos que en estos doce años las zonas degradadas (Alta y Muy Alta erosión y cambio de uso de suelo a urbano) se incrementan en aproximadamente 1,200 ha (3%) (tabla 5).

Como podía esperarse las áreas con Muy Alta erosión se encuentran ubicadas en zonas desprovistas de vegetación natural (zonas agrícolas) y que se combinan con pendientes pronunciadas. En especial esto es notorio en la parte central del área de estudio, donde además coinciden altos valores de erosividad de la lluvia y baja resistencia del suelo a la erosión. El efecto de la longitud y grado de la pendiente no es tan evidente en esta categoría de erosión. De hecho los valores más altos de estos dos factores se presentan en la región noreste principalmente en las cañadas, pero ahí se combinan con una cobertura arbórea densa, con baja erosividad de la lluvia y una alta resistencia del suelo a la erosión. Los valores de erosión Alta y Moderada se ubican principalmente en la porción suroeste del área de estudio. Ahí convergen valores de bajos a moderados para la erosividad de la lluvia, moderada resistencia del suelo a la erosión, valores bajos de pendiente del terreno. Sin embargo esa zona está dominada por actividades agrícolas lo cual deriva en una pérdida alta de suelo, como se muestra en la figura 7.

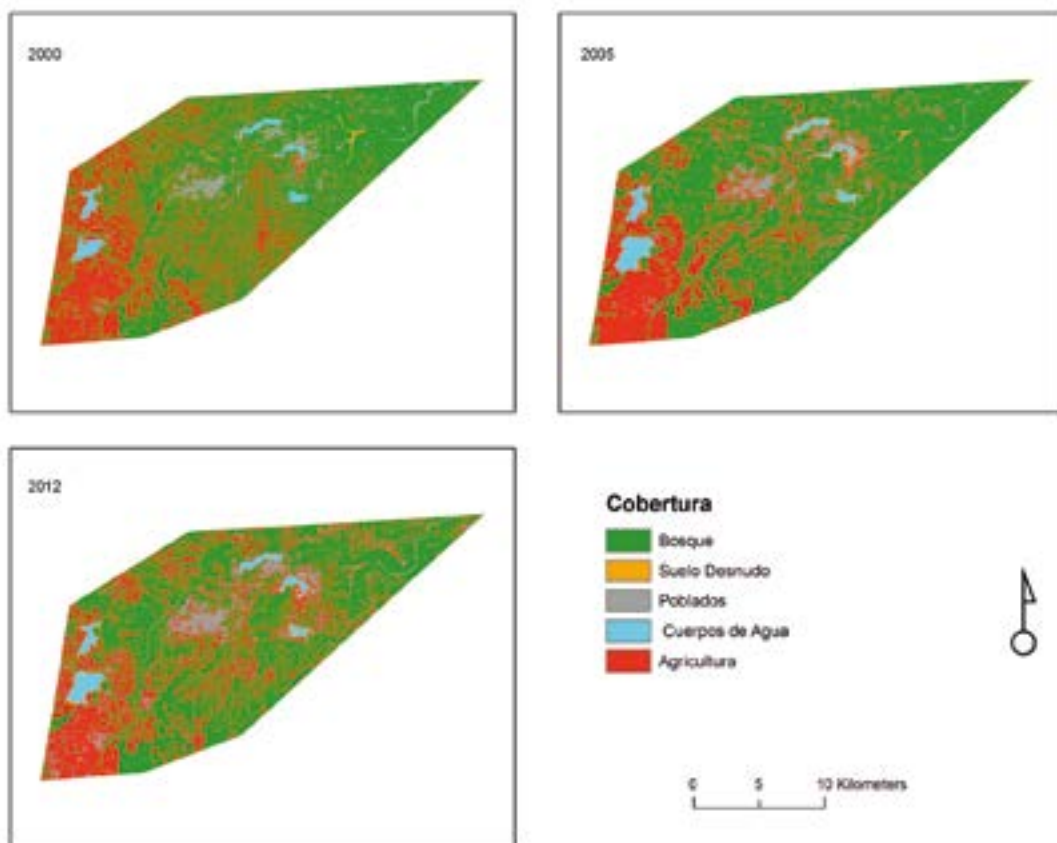


Figura 6. Serie histórica del uso del suelo 2000-2012.

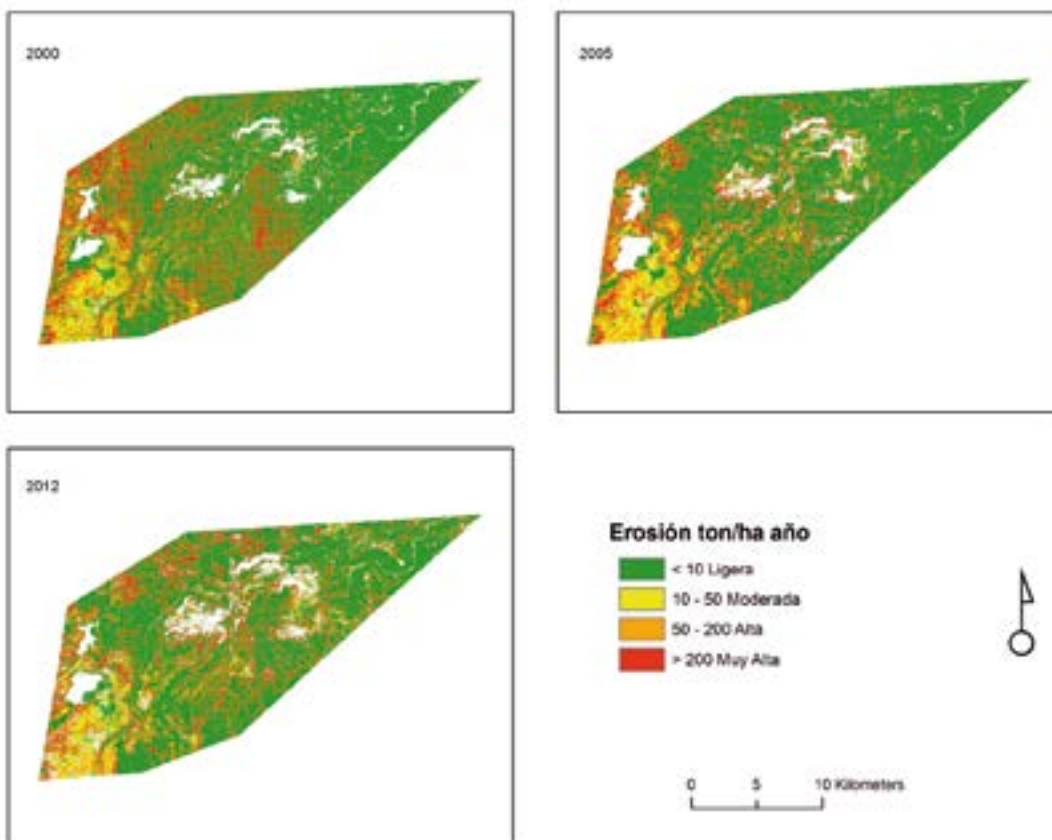


Figura 7. Pérdida de suelo 2000, 2005 y 2012 calculada con el método USLE.

Tabla 5.

Erosión ton/ha año	Área (ha)	%	Área (ha)	%	Área (ha)	%
	2000		2005		2012	
< 10 Ligera	25,154	69	25,260	69	23,799	65
10 - 50 Moderada	1,353	4	1,622	4	1,315	4
50 - 200 Alta	2,679	7	3,105	8	2,709	7
> 200 Muy Alta	5,490	15	4,186	11	5,191	14
Áreas excluidas del análisis						
Poblad	1,128	3	1,357	4	2,604	7
Agua	800	2	1,074	3	985	3

5.3. Sólidos sedimentables

Con respecto a los sólidos sedimentables del Lago de Nexapa, tomados en la época de lluvias 2012, se encontró escasa presencia de sólidos sedimentables, e inclusive nula, esto puede ser resultado de una baja erosión de los suelos aledaños, o bien a que el efecto del arrastre de suelos tenga un impacto inmediato después de una lluvia, pero de corta duración sobre los sólidos sedimentables que tienden a depositarse. Por otra parte la presencia de alto contenido de materia orgánica hace suponer que existe una elevada actividad biológica en el lago (tabla 6).

Tabla 6. Sólidos sedimentables del Lago Nexapa.

Muestra	Sólidos sedimentables (ml/l)	Materia Inorgánica (%)	Materia Orgánica (%)
I	0,04	10	90
II	0,00	0	0
III	0,00	0	0
IV	0,01	20	80
V	0,02	25	75
VI	0,00	0	0
VII	0,00	0	0
VIII	0,08	15	85
IX	0,00	0	0

6. DISCUSIÓN

Los resultados de las mediciones y de las determinaciones efectuadas mediante modelaje espacial que se presentan son parte de un esquema de monitoreo que se tiene planeado desarrollar al menos durante los próximos tres años. La idea del mismo consiste en repetirlas durante la época de secas y durante la de lluvia con el objetivo de tener elementos que permitan establecer el efecto del

cambio de cobertura terrestre sobre los procesos de pérdida de suelo y de sedimentación en los cuerpos de agua. Los levantamientos en campo de sólidos sedimentables y otros no presentados como batimetría fueron realizados en la época de lluvias del año 2012 para lo que se considera la época base del esquema de monitoreo. Los cambios que se registren en el largo plazo permitirán establecer con mayor certidumbre las relaciones entre los diferentes procesos de tal forma que se puedan predecir cambios en un proceso a partir de la descripción de aquellos que le sirven de insumo.

7. CONCLUSIONES

El incremento de las zonas agrícolas y principalmente de los poblados en el área de estudio han provocado en doce años una reducción de aproximadamente dos mil hectáreas en las zonas de bosque (5% del área de estudio). Esta degradación tiene repercusiones negativas en los procesos naturales y en los servicios ambientales que ofrecen estos ecosistemas forestales. En particular podemos decir, a través de su modelación, que la erosión se incrementará con la modificación del uso del suelo y que en general las zonas de degradación, consideradas como aquellas donde tendremos una pérdida de suelo mayor a 50 toneladas anuales por hectárea o que se convirtieron a suelo urbano aumentaron su superficie en aproximadamente 1,200 ha. Esto a su vez puede tener un impacto negativo sobre la calidad del agua de los embalses al fomentar el incremento en los sólidos sedimentables, lo cual no fue evidente en las muestras tomadas a finales de la época de lluvia de 2012. Sin embargo, estos resultados permiten establecer la línea base para instrumentar un sistema de monitoreo de la salud de la cuenca, que sin duda conducirá a tener un mejor conocimiento de las relaciones entre la modificación de la cobertura del terreno, la pérdida de suelo y el incremento de los sólidos sedimentables y datos de batimetría, con lo que se tendrán los elementos para un manejo más adecuado de los recursos naturales en la región.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Dekker, A G; Zamurovi -Nenad, Ž; Hoogenboom, H J; Peters, S W M. Remote sensing, ecological water quality modelling and in situ measurements: a case study in shallow lakes. *Hydrological Sciences Journal* 1996; 41: 531-547.
- [2] Chow, VT; Maidment, DR; Mays, LW. *Hidrología aplicada*. Bogotá, Colombia: McGrawHill; 1994.
- [3] Gregersen, HM; FFolliott, PF; Brooks, KN. *Integrated watershed management. Connecting people to their land and water*. Londres, Reino Unido: Cambridge University Press; 2007.
- [4] Vrieling, A. Satellite remote sensing for water erosion assessment: A review. *Catena* 2006; 65:2-18.
- [5] Shafique, NA; Fulk, F; Autrey, BC; Flotemersch, J. Hyperspectral Remote Sensing of Water Quality Parameters for Large Rivers in the Ohio River Basin. En Renard, K.G., McElroy, S.A., Gburek, W.J., Canfield, H.E., Scott, R.L., (Eds.) *First Interagency Conference on Research in the Watersheds*, October 27-30, 2003. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service; 2003.
- [6] Moore, G. Satellite remote sensing of water turbidity. *Hydrological Sciences Bulletin* 1980; 25:407-421.
- [7] Chuvieco, E. *Teledetección Ambiental*. España: Editorial Ariel, 2002. p. 604.
- [8] Salvador, R; Pons, X; Diego, F. Validación de un método de corrección radiométrica sobre diferentes áreas montañosas. *Revista Teledetección* 1996; 7:1-5.
- [9] Congalton, RG; Green, K. *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices*. EUA: CRC Press; 2009. p. 183.
- [10] Wischmeier, WH; Smith, DD. *Predicting rainfall erosion losses— A guide to conservation planning*. U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook No. 537. 1978.
- [11] FAO. *Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos*. Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo de la Agricultura y la Alimentación (FAO); 1980.
- [12] Figueroa, B; Amante, A; Cortés, HG; Pimentel, J; Osuna, ES; Rodríguez, JM; Morales, FJ. *Manual de predicción de pérdidas de suelo por erosión*. San Luis Potosí, México: Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos-Colegio de Posgraduados; 1991.
- [13] Mitasova, H; Hofierka, J; Zlocha, M; Iverson, LR. Modeling topographic potential for erosion and deposition using GIS. *Int. Journal of Geographical Information Science* 1996; 10: 629-641.
- [14] Rodríguez, MF; Florentino, A; Gallardo, J; García, RA. Sistemas de Información geográfica en la evaluación de la erosión hídrica en Badajoz-España aplicando la metodología USLE. *Agronomía Tropical* 2004; 54(4): 391-409.
- [15] Wischmeier, WH. A rainfall erosion index for a universal soil-loss equation. *Soil Sci. Soc. Am. Pro.* 1959; 23: 246-249.
- [16] Hudson, N. *Soil Conservation*. Ithaca, EUA: Cornell University Press; 1970.
- [17] Lal, R. Soil erosion on alfisols in Western Nigeria. III – Effects of rainfall characteristics. *Geoderma* 1976; 16: 389-401.
- [18] Arnoldus, HMJ. Methodology used to determine the maximum potential average annual soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco. *FAO Soils Bulletin* 1977; 34: 39-51.
- [19] Angulo-Martínez, M; López-Vicente, M; Vicente-Serrano, SM; Beguería, S. Mapping rainfall erosivity at a regional scale: a comparison of interpolation methods in the Ebro Basin (NE Spain). *Hydrol. Earth Syst. Sci* 2009; 13: 1907-1920.
- [20] Cortés, THG. *Caracterización de la erosividad de la lluvia en México utilizando métodos multivariados*. México: Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Posgraduados, 1991. p. 168.
- [21] Morgan, RPC. Processes and mechanics of erosion, en: *Topics in applied geography*. Soil Erosion Davidson, D. y J. Dawson, Editores: Nueva York: John Wiley and Sons; 1979.
- [22] APHA, AWWA, WPCF. *Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales*. Madrid, España: Díaz de Santos; 1992. pp 2-86.

Conflicto de intereses

Los autores hemos recibido ayuda económica de FUNDACIÓN MAPFRE para la realización de este proyecto. No hemos firmado ningún acuerdo por el que vayamos a recibir beneficios u honorarios por parte de alguna entidad comercial o de FUNDACIÓN MAPFRE.

9. ANEXOS

Anexo 1. Tipos de Bosque



Bosque tropical perennifolio.



Bosque de encino-pino.



Bosque mesófilo de montaña.



Bosque de Pino.