

Bases de Diagnóstico: Identificación de Zonas Susceptibles a la Erosión en el Estado de México



SECRETARÍA DEL MEDIO AMBIENTE
DIRECCIÓN GENERAL DE PREVENCIÓN Y
CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA



Directorio

Lic. Enrique Peña Nieto
Gobernador Constitucional del Estado de México

Mtro. Guillermo Velasco Rodríguez
Secretario del Medio Ambiente

Lic. Roberto Cervantes Martínez
Director General de Prevención y
Control de la Contaminación Atmosférica

**Bases de Diagnóstico: Identificación de Zonas
Susceptibles a la Erosión en el Estado de México**

Gobierno del Estado de México
Secretaría del Medio Ambiente
Vía Gustavo Baz Prada, 2160, 2do. piso
Viveros del Río, Tlalnepantla de Baz
Estado de México C. P. 54060

Elaboración: Octubre de 2008

Hecho en México

www.edomex.gob.mx

Bases de Diagnóstico: Identificación de Zonas Susceptibles a la Erosión en el Estado de México

Contenido:

Introducción	5
I. Degradación del Suelo	7
1.1 Erosión Hídrica.....	7
1.2 Erosión Eólica.....	8
1.3 Degradación Química.....	9
1.4 Degradación Física	9
1.5 Degradación Biológica.....	9
1.6 Actividades que Provocan la Degradación del Suelo	10
2. Erosión en el Estado de México	13
2.1 Tipos de Suelos Susceptibles a la Erosión	13
2.2 Cuantificación de la Superficie Erosionada.....	15
2.3 Emisión de Partículas PM ₁₀ por la Erosión Eólica.....	16
2.4 Zonas Frágiles	18
3. Superficies Susceptibles a la Erosión y Desertificación según Región Hidrográfica	23
4. Técnicas para la Recuperación de Suelos	31
4.1 Especies Vegetales Sugeridas para Reforestación.....	34
Conclusiones	37
Bibliografía	39

Introducción

Los tipos de suelo presentes en el Estado de México son el resultado de una compleja historia geológica. Algunas zonas del territorio estatal emergieron del fondo oceánico, mientras que otras han sido conformadas, en gran medida, por la actividad volcánica. Los diversos tipos de roca, producto de tal dinámica geológica han interactuado en formas diferentes con el agua, el clima y la biota, dando como resultado la capa superficial conocida como suelo, que es imprescindible para la vida.

La vida en tierra firme depende del suelo. Con algunas excepciones, todos los seres vivos requieren de este recurso para vivir. Es uno de los tres elementos naturales, además del agua y el aire, considerado fundamental para la supervivencia del hombre, ya que sostiene la producción forestal, ganadera y alimentaria (granos básicos, hortalizas y frutas); brinda protección y alimento a las especies silvestres; permite almacenar el agua en mantos acuíferos a través de la filtración; provee de humedad a la vegetación, junto con la cual regula el ciclo hidrológico; tiene un papel importante en el amortiguamiento de variaciones climáticas severas; en pocas palabras, soporta la capacidad biológica del ecosistema. Por lo anterior, lo convierte en un recurso natural no renovable, considerando la escala de tiempo que requiere para su formación, la cual es mayor que la del ser humano.

La erosión es un fenómeno geológico natural causado por la acción del agua y del viento, que consiste en el desprendimiento y acarreo de partículas del suelo. La erosión se origina por la combinación de varios factores tales como el intemperismo, la inclinación del relieve, los incendios forestales, además de ciertas características intrínsecas del suelo que pueden hacerlo más propenso a la erosión como el escaso desarrollo de los horizontes superiores, textura limosa o bajo contenido en materia orgánica. No obstante, las actividades humanas pueden acelerar de forma importante la tasa de erosión debido al uso inadecuado del suelo, lo que conlleva a la reducción de su capacidad para sostener los ecosistemas naturales y urbanos.

Entre las formas más comunes de utilización no sostenible del suelo están el cultivo y pastoreo excesivos, la deforestación, las prácticas inadecuadas de riego, los cambios del uso de suelo y la incorrecta disposición de residuos peligrosos y municipales. El alto grado de deterioro de la tierra refleja un profundo desconocimiento a nivel político, social y económico sobre el papel ambiental que cumple este recurso; los límites que se tienen para su aprovechamiento; el uso de técnicas apropiadas y los beneficios que puede brindar la instrumentación de políticas sostenibles y la aplicación de normatividad en torno a la conservación y al uso del suelo.

En el país no existen zonas que por su ubicación geográfica sean sensibles a la erosión, sino que depende del grado de afectación provocada por la influencia del hombre sobre esas regiones, por lo que cualquier lugar está expuesto a sufrir serios daños por los efectos de la erosión. Las estimaciones de la superficie afectada por la erosión en el país son muy diferentes, pero a partir de 1965 todas coinciden en que más de 60 % del territorio nacional es susceptible a procesos de degradación del suelo, y que al menos 15 % ya muestra afectación.

En el caso del territorio del Estado de México, la información más reciente considera que 24.4 % manifiesta afectación por erosión hídrica y 4.8 % por erosión eólica. En la entidad mexiquense el problema de la erosión se presenta, sobre todo, en los lomeríos y sierras los cuales se caracterizan por su topografía irregular, accidentada y montañosa. Tomando en cuenta que 76.1 % del territorio

tiene este tipo de relieve y que 31 % de las zonas de cultivo de temporal se desarrolla en esos sitios, se puede decir que el problema es grave.

Actualmente, la demanda interna por alimentos y materias primas continua aumentando, lo que genera una presión creciente sobre los recursos naturales. Tal es el caso de los suelos fértiles, los cuales experimentan un alto grado de deterioro, así como vulnerabilidad a la sequía y a los procesos de desertificación. Algunos estudios de carácter internacional mencionan que debido a la erosión se requiere aumentar anualmente 27 % los costos de producción para mantener el mismo nivel productivo de las tierras de cultivo.

Por su parte, el INEGI estima en 18.8 millones de pesos las pérdidas económicas anuales por la erosión del suelo en el país, sin embargo, esta cifra no considera los efectos que ocasiona la reducción de la capacidad productiva de la tierra de cultivo. A grandes rasgos, se advierte que los mayores costos económicos derivados de la erosión repercuten en dragar ríos y puertos para mantenerlos navegables; en la disminución de la capacidad de almacenamiento de presas y embalses; en la reparación de daños a comunidades y áreas de cultivo en las márgenes de ríos por desbordamientos y corrientes de lodo; así como en daños causados por deslaves sobre vías de comunicación terrestres, líneas de corriente eléctrica, gasoductos, oleoductos, red de agua potable o drenaje.

La degradación del suelo y la consecuente reducción en la capacidad para proveer alimento para una población creciente, es un tema crítico cuando se considera la seguridad alimenticia del país. Especialmente si se toma en cuenta que solamente el 19 % del territorio nacional es apto para la agricultura y menos del 24 % de esa superficie tiene posibilidades de irrigación. Es de importancia estratégica conocer las condiciones del suelo, su distribución, extensión y tendencias en el proceso de degradación, así como los resultados de las políticas de restauración y mantenimiento de su calidad.

Con el mayor interés acerca de esta problemática, la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Estado de México (SMAGEM), por conducto de la Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica (DGPCCA), se propuso indagar lo más reciente y disponible sobre la erosión del suelo en la entidad, así como realizar un ejercicio de identificación de las zonas con potencial erosivo, aprovechando la información cartográfica digitalizada con la que cuenta el Departamento de Diagnóstico, complementando de esta forma el Diagnóstico Ambiental del Estado de México. Todo esto en el marco de las atribuciones que le otorga el artículo 4.º, fracción XXX, del Reglamento del Libro Segundo del Código para la Biodiversidad del Estado de México, así como el artículo 9.º, fracción IX, del Reglamento Interior de la Secretaría del Medio Ambiente.

El documento *Bases de Diagnóstico: Identificación de Zonas Susceptibles a la Erosión en el Estado de México*, está integrado por cuatro secciones. La primera parte, “Degradación del suelo”, sirve como marco conceptual para entender en qué consiste el deterioro del suelo, y los tipos y características de los procesos erosivos. En la segunda parte, “Erosión en el Estado de México”, se expone de manera puntual lo correspondiente a tipos de suelos, zonas frágiles, superficies erosionadas y emisiones a la atmósfera provenientes de la erosión del suelo. La tercera sección, “Superficies susceptibles a la erosión y desertificación según región hidrográfica”, describe los resultados del ejercicio de sobreposición cartográfica y cálculo de superficies; y en la cuarta sección, “Técnicas para recuperación de suelos”, se recopilan sucintamente algunas prácticas para la conservación del suelo y el control de la erosión recomendadas por instituciones expertas en la materia.

I. Degradación del Suelo

El suelo es la parte exterior de la corteza terrestre en donde las rocas se han desintegrado por efecto del intemperismo, formando una cubierta en la que viven distintos organismos microscópicos que, actuando en conjunto, transforman materia mineral en alimento de las plantas para que éstas, a su vez, puedan ser utilizadas posteriormente por los animales y los seres humanos. Así, el suelo es el resultado de la interacción del clima, la roca madre, el drenaje, la topografía, la microbiota y la vegetación a lo largo del tiempo.

El suelo permite el establecimiento de actividades forestales, ganaderas y agrícolas, siempre y cuando cumpla ciertas características, es decir, que mantenga su capacidad para sostener la productividad vegetal y animal, así como mantener o mejorar la calidad del aire y agua. La importancia del suelo como recurso radica en su naturaleza no renovable, debido a que su formación requiere de 100 a 400 años. A pesar de su importancia, el ser humano ha propiciado que se deteriore, incluso, se pierda este recurso natural.

La degradación del suelo ocurre a través de diferentes procesos siendo los más importantes la erosión hídrica y eólica, así como la degradación intrínseca del suelo debido a procesos químicos, físicos y biológicos. Cuando tales procesos aparecen en forma natural tienen cierto grado de lentitud y sus manifestaciones no se identifican a corto plazo, sino cuando se encuentra en una fase final, esto es, cuando se ha perdido la mayor cantidad de suelo fértil. Al intervenir el hombre, para abrir caminos, desmontar áreas para campos de cultivo, explotar los bosques y ampliar las zonas urbanas, entonces, se altera el equilibrio natural y estos procesos se aceleran. A continuación se explica brevemente cada uno de los procesos de degradación.

I.1 Erosión Hídrica

La erosión hídrica consiste en la remoción del suelo por la acción del agua y tiene al menos tres etapas: (1) el desprendimiento de las partículas del suelo, ya sea por el golpeteo de las gotas de lluvia o por el arrastre de una corriente superficial; (2) la transportación del material por el agua; y (3) la sedimentación del material.

La erosión hídrica puede ser de tipo superficial o profunda, ocasionando en ambos casos la deformación del terreno. La erosión superficial ocurre donde el agua fluye de forma homogénea por una zona arrastrando la capa superior del suelo. En otras ocasiones el flujo del agua se concentra en un cauce, de modo que abre una zanja o cárcava cada vez más profunda. La movilidad del sustrato en las cárcavas es muy alta, por lo que el suelo y las pocas plantas que llegan a germinar en esas condiciones son arrastrados, lo que hace muy difícil detener este proceso debido a que no hay vegetación que pueda retener el suelo. Por esta razón, la erosión por cárcavas se considera severa, incluso, extrema.

En el país, la mayor pérdida de suelo la ocasiona la lluvia en todas sus facetas, desde el golpe de las gotas de lluvia sobre el suelo hasta los escurrimientos superficiales tanto en las laderas como en los cauces. La erosión en las laderas se dice que es una erosión laminar y es donde se obtiene el mayor aporte de sedimento fino que transporta un cauce, en cambio, el flujo en los cauces transporta gran

variedad de material desde partículas muy finas hasta rocas de gran tamaño. Un caso de erosión que ocurre en los cauces en forma rápida con consecuencias desastrosas de gran magnitud es el que se genera durante un *flujo de escombros*, esto es, un flujo con gran velocidad y concentraciones altas de sedimento que tiene lugar generalmente en cuencas pequeñas con gran pendiente.

La erosión hídrica afecta no sólo a las zonas de las cuales se retira el sustrato, sino a aquellas que son sepultadas por el depósito del sedimento acarreado. Asimismo, la severidad de la erosión hídrica depende de la cantidad de material que se aporte a través del desprendimiento y de la capacidad del agente erosivo para transportarlo. Al respecto, el azolve de presas, ríos y puertos es uno de los problemas más graves provocados por la sedimentación, lo que repercute en la vida útil de este tipo de obras para dotación de agua, generación de energía eléctrica y servicio de vías de comunicación navegables.

I.2 Erosión Eólica

La erosión eólica es el proceso por el cual el viento recoge y transporta material superficial del suelo, al mismo tiempo que las partículas llevadas por el viento desgastan la superficie del terreno. Así, la erosión eólica remueve la porción más fértil del suelo y, por tanto, disminuye su productividad. Cabe destacar que parte de este suelo entra en suspensión y se convierte en polvo atmosférico.

La erosión eólica, así como la hídrica, depende de la fuerza con la que el fluido (en este caso, el aire) actúa en las partículas del suelo. Para cualquier fluido, la fuerza de resistencia que ejerce en una partícula depende de la rugosidad de la superficie en la que se halle, pero en el caso del viento, la rugosidad juega un papel crítico, debido a que su baja densidad repercute en su capacidad de transportación. Donde la superficie es muy rugosa, la velocidad del viento cerca de ésta será baja y ocurrirá una cantidad muy pequeña de erosión. Cualquier superficie relativamente suave, como el caso de un terreno desnudo, es muy susceptible a la erosión eólica y este riesgo se incrementa para aquellos suelos que contienen cantidades apreciables de materiales con tamaño de limo.

La erosión eólica es un fenómeno que depende principalmente del clima, el suelo y la vegetación, los cuales, al conjugarse bajo determinadas condiciones propician o restringen este tipo de erosión. La erosión eólica ocurre generalmente bajo las siguientes condiciones: escasa precipitación, fuertes oscilaciones de temperatura entre el día y la noche, vientos fuertes, áreas extensas de exposición, terrenos con superficie uniforme o plana, suelos secos y sueltos y en zonas con escasa o nula cubierta vegetal.

La erosión eólica repercute en la salud de la población de los centros urbanos y localidades próximas a las zonas afectadas, esto se debe a que las partículas de polvo emitidas por los suelos erosionados se suman a la carga de contaminantes proveniente de otras fuentes, como los vehículos y las industrias, con lo que contribuyen a aumentar la frecuencia de enfermedades respiratorias, principalmente. Asimismo, la contaminación por partículas suspendidas puede limitar ciertas actividades productivas y recreativas que requieran realizarse al aire libre. La importancia del abatimiento de la emisión de partículas por esta fuente natural es tal, que se han incluido diversas acciones en los distintos programas de gestión de la calidad del aire, como los *Proaires*, tanto de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT) como de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM).

I.3 Degradación Química

La degradación química se refiere a la salinización, acidificación o contaminación del suelo y sucede bajo diferentes condiciones. A continuación se describe cada uno de éstos.

La salinización consiste en el incremento de la cantidad de sales en el suelo. Aunque este proceso sucede de manera natural en climas donde la precipitación es menor que la evapotranspiración, el riego puede agravar la salinidad cuando se emplea, por ejemplo, aguas negras, las cuales tienen un alto contenido de minerales como el sodio. También, el riego excesivo puede elevar el manto freático formando salitre en la superficie tal y como sucede en terrenos con drenaje deficiente o alta evaporación.

La acidificación se produce cuando se ve alterado el potencial de hidrógeno (pH) del suelo debido, por ejemplo, con la presencia de ciertos iones como el aluminio. En ocasiones, dicho cambio puede resultar tóxico. El clima, la fisiografía y la pérdida de la cubierta vegetal son factores que alteran las propiedades ácidas o básicas de los suelos.

La contaminación del suelo deriva del uso excesivo de productos agroquímicos, tanto de fertilizantes como de pesticidas, de los derrames y fugas de combustibles, de la inadecuada disposición de los residuos peligrosos, sólidos urbanos y de las actividades mineras.

I.4 Degradación Física

La degradación física se relaciona con la pérdida de la capacidad del sustrato para absorber y retener agua, lo que sucede cuando el suelo se compacta y endurece. Al ocurrir esto, se reduce la infiltración y percolación de la lluvia; entonces, la escorrentía se hace variable y fluye torrencialmente aumentando las inundaciones que a su vez causan daños a los cursos de las quebradas y a los sistemas naturales de las llanuras. Un aumento en escorrentía conlleva una capacidad mayor para arrastrar sedimentos, lo que a su vez aumenta la erosión.

La transformación de grandes extensiones de bosque a uso pecuario o agrícola reduce la cantidad de evapotranspiración y aumenta la reflectividad de la superficie. Ambos factores contribuyen a reseca y compactar el suelo respectivamente. En la cuenca del Balsas, por ejemplo, donde se da la mayor precipitación pluvial del Estado de México, un desmonte extenso con fines de apertura a nuevos campos de cultivo, podría reducir la capacidad de absorción del agua de lluvia hacia mantos acuíferos, afectándose los propios proyectos agrícolas para los cuales se deforestó originalmente.

I.5 Degradación Biológica

La degradación biológica se refiere a la pérdida de materia orgánica y de los procesos que mantienen la fertilidad del suelo. Esto se observa, por ejemplo, en los casos donde se remueven grandes cantidades de materia orgánica directamente en forma de madera o se alteran mediante prácticas agrícolas tales como la conocida *tumba-roza-quema*. Como consecuencia, la caída de hojarasca y la descomposición orgánica disminuyen considerablemente o se eliminan, causando la disgregación de las

partículas de tierra, la pérdida de la capacidad para retener la humedad y la fertilidad del suelo. El terreno así expuesto se desintegra fácilmente por el impacto de la lluvia y por las escorrentías.

I.6 Actividades que Provocan la Degradación del Suelo

Los procesos de erosión se aceleran cuando el ecosistema es perturbado por causas naturales como tormentas, torbellinos e incendios, o bien, por actividades humanas como los cambios del uso de suelo, lo cual implica la apertura de nuevas áreas para la agricultura, ganadería, urbanización y la construcción de caminos, presas y otras obras de infraestructura a partir del suelo forestal. La erosión acelerada por estos factores no alcanza a ser compensada por los procesos naturales de formación del suelo lo que causa su empobrecimiento paulatino.

- *Sobrepastoreo*

El sobrepastoreo es una de las principales actividades que propician la destrucción de la cubierta vegetal. Esta actividad no solo implica el cambio de uso de suelo, sino también la inducción de pastizales que por consecuencia cambia la composición de especies vegetales, muchas veces con escaso valor forrajero. Además de la excesiva carga animal, este factor incluye el pisoteo que propicia la compactación del suelo, lo que a su vez ocasiona que el agua no se filtre y ésta corra con más facilidad sobre la superficie del suelo generando erosión.

- *Agricultura*

Diversas prácticas dentro de la agricultura están relacionadas con la degradación del suelo. Están por ejemplo, la siembra en laderas con inadecuadas prácticas de roturación y surcado, la labranza postcosecha, la sobrexplotación de cultivos intensivos anuales con la consecuente pérdida de nutrientes, el riego abundante en zonas con alta evaporación, el riego con agua de mala calidad, y el abandono de terrenos agrícolas cuando la producción deja de ser redituable, lo que induce cambios de uso de suelo.

- *Sobrexplotación de mantos acuíferos*

La sobrexplotación de mantos acuíferos provoca que los niveles de agua incrementen su profundidad, lo que ocasiona que los costos de bombeo se incrementen excesivamente, a tal grado que se propicie el abandono de estas áreas.

- *Incendios forestales*

Los incendios forestales, bajo ciertas circunstancias, favorecen la re-mineralización del suelo y regulan la dinámica poblacional de ciertas especies vegetales. Sin embargo, los incendios inducidos por la actividad del hombre, los cuales pueden darse con más frecuencia que los incendios naturales, conducen a la disminución o pérdida de la actividad biológica de éste y un desequilibrio en los ciclos biogeoquímicos.

- *Deforestación*

Otra actividad de alto impacto es la tala o deforestación, que implica la remoción total de la biomasa vegetal, generalmente arbórea, con propósito de extracción de madera. Dicha práctica, además de la pérdida del suelo, altera las condiciones microclimáticas, el hábitat y el valor escénico del lugar.

Aunado a ello está la sobrexplotación de productos no maderables como la extracción de leña, tierra y tierra de hoja. Contrario a la deforestación, no se remueve toda la vegetación, pero la que queda no ofrece una protección suficiente contra la erosión del suelo.

- *Contaminación del suelo*

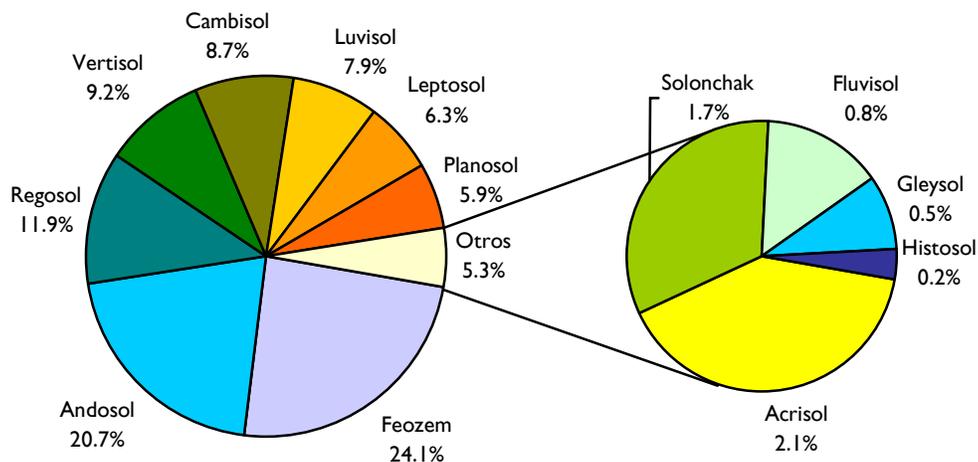
La contaminación del suelo tiene diferentes orígenes, por ejemplo, los lixiviados resultantes de la descomposición de la materia orgánica contenida en los residuos sólidos municipales dispuestos en forma inadecuada, así mismo, las sustancias tóxicas provenientes de desechos o procesos industriales; los derrames de hidrocarburos tales como combustibles, aceites y petróleo; el uso de aguas negras sin ningún tratamiento que reduzca la alta carga de contaminantes, entre los cuales se hayan metales pesados; y los residuos conocidos como jales, generados durante la extracción de minerales metálicos.

2. Erosión en el Estado de México

2.1 Tipos de Suelos Susceptibles a la Erosión

Las condiciones geológicas, topográficas y climáticas del Estado de México propician una gran variedad de suelos, los cuales están representados por 13 grupos edáficos de los 28 establecidos en el mapa mundial de suelos de la FAO-UNESCO. En poco más de la mitad del territorio estatal (56.7 %) están presentes tres grupos de suelo: feozem (24.1 %), andosol (20.7 %) y regosol (11.9 %); el resto de la superficie está representado por otros diez grupos edáficos, lo cual establece la gran diversidad de suelos y la complejidad para su uso y manejo (gráfica 2.1).

Gráfica 2.1 Composición de los diferentes grupos edáficos en la entidad



Fuente: GEM (1993)

El grupo de los feozem, localizados en planicies, se caracterizan por ser suelos aptos para la agricultura, asimismo, aquellos localizados en laderas o pendientes pronunciadas se emplean en actividades pecuarias. Los andosoles son suelos que se han formado a partir de ceniza volcánica; su textura es muy suelta por lo que tienen una gran susceptibilidad a la erosión eólica e hídrica; su uso en la ganadería y agricultura es poco redituable. Los regosoles son suelos formados por material suelto, con frecuencia son someros y pedregosos; su aptitud para la agricultura es moderada, se localizan en zonas montañosas y lomeríos (figura 2.2).

En el cuadro 2.1 se describen las características de los ocho tipos de suelo con más susceptibilidad a la erosión presentes en la entidad.

Cuadro 2.1 Tipos de suelo con más susceptibilidad a la erosión

Tipo de suelo	Características por las que son susceptibles a la erosión
Andosol	Poseen gran capacidad de retención de humedad y son muy sueltos. Presentan erosión laminar por su ubicación en laderas. Se encuentran bajo presión de la actividad humana debido al cambio de uso de suelo de forestal a agropecuario.
Cambisol	Suelos poco desarrollados; pueden tener acumulación de materiales como arcilla y carbonato de calcio, lo que provoca que alguna capa se sature con agua. En general, en éstos se desarrollan pastizales por lo que se usan para ganadería
Feozem	Al estar presentes en zonas semiáridas son susceptibles a la desertificación. En zonas templadas, al ser desprovistos de cubierta vegetal, hay pérdida de nutrientes por el lavado de lluvia. Muestran erosión laminar por su ubicación en laderas. Debido a que poseen varios usos, la actividad humana acelerar su degradación.
Leptosol	Escasa profundidad (menor de 30 cm), lo que los vuelve áridos. El calcio que contienen puede inmovilizar los nutrientes minerales.
Luvisol	Son suelos típicos donde la precipitación es alta; se caracterizan por presentar una acumulación de arcilla o sesquióxidos en el subsuelo. Se utilizan con fines agrícolas y, en menor medida, pecuarios.
Planosol	Tienen un drenaje deficiente debido a una capa en el subsuelo de muy baja permeabilidad. Están presentes en zonas áridas por lo que son susceptibles a la desertificación.
Regosol	Consisten en suelos someros y pedregosos, revelan un subsuelo arcilloso e impermeable, así como una capa de tepetate, lo que impide la infiltración del agua al subsuelo, lo que a su vez favorece la erosión hídrica. Su vegetación natural es el pastizal por lo que se usan para ganadería.

Fuente: GEM (1993), INEGI (1989)

2.2 Cuantificación de la Superficie Erosionada

Las estimaciones sobre la magnitud de la erosión del suelo son muy diferentes debido a que algunas consideran, en la suma total, tanto el área afectada como el área de influencia de la degradación, mientras que otras, únicamente el área afectada. Esto conlleva a tener distintas apreciaciones del problema ambiental de este fenómeno. Por ejemplo, en el caso de la erosión hídrica, la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (en: INEGI y SEMARNAP, 1998), reporta 10 112 km² con riesgo, de los cuales 60 km² presentan riesgo bajo; 1 963 km², medio; y 8 089 km², alto.

Los mismos autores citan a Estrada, quién señala una superficie afectada de 21 196 km², de los que 4 197 km² presentan una afectación ligera; 8 945 km², moderada; 2 692 km², severa; y 5 363 km², muy severa. En este caso la superficie con riesgo es menor que la superficie afectada. Otras estimaciones se pueden consultar en DGEPE (1993) e INEGI y SEMARNAP (2000).

El cuadro 2.2 indica el potencial de la erosión según el tipo de proceso y grado de degradación estimado por INE-SEMARNAT y la Universidad Autónoma de Chapingo (2002). La superficie con potencial de erosión hídrica es de 15 800 km², lo que representa 71.2 % del territorio estatal, mientras que la eólica es de 15 570 km², lo que equivale a 70.2 %. Ahora bien, en lo correspondiente al potencial hídrico, 13.4 % es muy severo y 25.1 % severo, lo que sitúa al Estado de México dentro de las cinco entidades federativas de la república mexicana con más deterioro.

Con relación al potencial eólico, 4.2 % es severo y 66.3 %, moderado. Cabe destacar que el potencial eólico moderado tiene la mayor superficie (10 330 km²) de los dos procesos de erosión.

Cuadro 2.2 Superficie de erosión potencial de suelo, por grado y tipo de proceso (2002)

Grado	Hídrica		Eólica	
	km ²	(%)	km ²	(%)
Ligero	2 730	17.3	4 590	29.5
Moderado	6 980	44.2	10 330	66.3
Severo	3 970	25.1	650	4.2
Muy severo	2 120	13.4	0	0.0
Total	15 800	100.0	15 570	100.0

Fuente: INE-SEMARNAT (2006)

La potencialidad de la erosión se refiere a la velocidad o volumen que se pierde de suelo en determinado tiempo, lo cual se expresa en toneladas por hectárea por año o t/ (ha·a). De esta forma el potencial ligero comprende un rango de 5-10 t/ (ha·a); el moderado, de 10-50 t/ (ha·a); el alto, de 50-200 t/ (ha·a); y el severo, mayor de 200 t/ (ha·a).

Aunque no se puede hablar de una tendencia por la poca información disponible y los distintos métodos con que se han realizado tales estimaciones, al comparar la información de dos fuentes similares INEGI y SEMARNAP (1998) y SEMARNAT (2006), se observa cierto aumento en la superficie alterada por la erosión hídrica, pues de 1994 a 2002, pasó de 10 111 km² a 15 800 km², por el contrario, de 1993 a 2002 la superficie afectada por la erosión eólica pasó de 21 196 km² a 15 570 km². Esto supone, al menos en el caso de la erosión eólica, que las acciones referentes a prevención y combate de incendios forestales y la instrumentación de programas de reforestación y de restauración de suelos han generado un impacto positivo teniendo como evidencia la reducción de las emisiones de partículas suspendidas, al menos en lo que respecta a la ZMVM.

2.3 Emisión de Partículas PM₁₀ por la Erosión Eólica

A pesar de que la erosión es un proceso natural, ésta se ha acelerado debido a las actividades humanas tales como la deforestación, las quemas y prácticas agrícolas, lo que a su vez ha llevado a la alteración del régimen hidrológico y con ello, a una mayor susceptibilidad a la erosión, o bien, a la remoción de suelos. Dicha situación se magnifica al considerar los fuertes vientos, principalmente en

época de secas, los cuales se producen durante las horas más calientes del día, provocando remolinos que se levantan a gran altura y suspenden grandes cantidades de polvo y partículas finas.

Por lo anterior, la erosión eólica puede representar un problema ambiental, de salud y económico al deteriorar la calidad del aire tanto en zonas rurales como en urbanas debido a la emisión de partículas de fracción respirable menores a 10 micras o PM_{10} .

Entre los principales factores que actúan en la erosión eólica están:

- Fenómenos meteorológicos: precipitación, temperatura, humedad atmosférica y vientos. A mayor precipitación y contenido de humedad, mayor resistencia del suelo.
- Características del suelo: el potencial erosivo del suelo por causa de los vientos está relacionada con la textura y estabilidad estructural. Los suelos de textura gruesa son más susceptibles a erosionarse y menos propensos a formar estructuras estables.
- Rugosidad de la superficie: al aumentar la rugosidad de la superficie se reduce la velocidad del viento y, por tanto, disminuye la posibilidad de traslación de las partículas del suelo.
- Vegetación: Es uno de los factores más importantes de protección contra la acción del viento. La vegetación actúa como una capa protectora o amortiguadora entre la atmósfera y el suelo. Los componentes aéreos, como hojas y tallos, absorben parte de la energía de las gotas de lluvia, del agua en movimiento y del viento, de modo que su efecto es menor que si actuaran directamente sobre el suelo.

Con base en los inventarios de emisiones, se estima que en los municipios conurbados que conforman la ZMVM (en lo sucesivo MC-ZMVM), en los años 1994 y 1998 la erosión del suelo aportó 34.4 % y 40.1 % del total de PM_{10} generadas por los distintos tipos de fuentes (fijas, móviles y naturales). En cambio, en los años 2000 y 2004 esta participación disminuyó notablemente al pasar de 32.6 % a 5.8 %. Respecto a la ZMVT el aporte de partículas en el 2000 y 2004 representó 60.4 % y 44.2 %, respectivamente.

A partir de los datos presentados en el cuadro 2.3 referentes al aporte anual de PM_{10} , se obtiene para los MC-ZMVM un promedio de 1 619.3 toneladas anuales y para la ZMVT, 1 354.3 toneladas. Al considerar la superficie erosionable de los MC-ZMVM igual a 1 446.7 km^2 se tiene una relación de 1 119.3 kg/km^2 . En el caso de la ZMVT la superficie erosionable comprende 1 165.3 km^2 , por lo que la relación resultante es de 1 162.2 kg/km^2 . Lo anterior permite determinar que la erosión en la ZMVT está más agravada que en los MC-ZMVM, pues a pesar de contar con menos superficie, tiene más emisión de partículas por unidad de superficie.

Cuadro 2.3 Aporte de PM_{10} debido a la erosión eólica por año según zona metropolitana
Toneladas anuales

Zona metropolitana	Año						Promedio
	1994	1996	1998	2000	2002	2004	
MC-ZMVM	1 671	1 636	1 592	1 683	1 953	1 181	1 619.3
ZMVT	N. E.	1 497	N. E.	2 198	N. E.	368	1 354.3

N. E. = No estimado

Fuente: SMAGDF, Inventarios de Emisiones, varios años; GEM (1997); SEGEM (2005); DGPCCA (2007)

2.4 Zonas Frágiles

Según la Agenda XXI, adoptada en la Cumbre de la Tierra (1992), hay dos tipos de zonas que se reconocen como frágiles. Se trata de los sistemas montañosos y las zonas áridas o con clima seco. Ambas están representadas en el Estado de México. Su fragilidad se expresa en varias dimensiones, como la social o la biológica, pero es en los suelos donde muestra su manifestación más dramática.

- *Sistemas montañosos*

Las montañas se consideran zonas estratégicas debido a la gran cantidad de recursos naturales que albergan, además, representan los parteaguas a partir de los cuales se pueden delimitar y administrar regiones hidrográficas. No obstante, los sistemas orográficos se consideran frágiles por las razones siguientes:

- Los sistemas montañosos de gran altura tienen clima frío por lo que los procesos biológicos son más lentos, lo que se debe tener en cuenta al extraer recursos como leña o suelo, ya que la recuperación del ecosistema será muy lenta, incluso, irreversible.
- Los deslaves y derrumbes contribuyen con pérdida de suelo.
- Los suelos que se encuentran en las montañas son fácilmente erosionables, ya sea porque se traten de suelos muy someros, impermeables o poco consolidados.

El territorio del Estado de México, se encuentra enclavado en el sistema orográfico de la provincia del Eje Neovolcánico Transversal que comprende las subprovincias Mil Cumbres, Lagos y Volcanes de Anáhuac y Llanuras y Sierras de Querétaro e Hidalgo; y en la provincia Sierra Madre del Sur que comprende las subprovincias Depresión del Balsas y Sierras y Valles Guerrerenses. El relieve es bastante irregular pues en 76.1 % del territorio predomina sierras y lomeríos, en tanto que en el restante 23.9 %, llanuras y valles (cuadro 2.4).

Cuadro 2.4 Distribución de las geoformas del Estado de México

Geoforma	Superficie (km²)	Porcentaje que representa (%)
Sierra	9 849.33	43.77
Lomerío	7 270.84	32.31
Llanura	3 256.55	14.48
Valle	1 528.91	6.80
Meseta	594.32	2.64
Total	22 499.95	100.00

Fuente: IIGCEM (s. f.)

En la figura 2.3 se aprecia que al norte de la región Pánuco se encuentran las sierras Tepetzotlán y Pachuca; al sur, la sierra Chichinautzin; al poniente, las sierras Las Cruces, Montes Altos y Montes Bajos; y al oriente, la sierra Nevada. Al interior de la cuenca se levanta la Sierra de Guadalupe.

Por su parte, la región Lerma está limitada al sur por la sierra Matlazinca, que es extensión de la sierra Chichinautzin; al poniente, por las sierras Nevado de Toluca, Valle de Bravo, Tlalpujahuá y Carimangacho. En su interior destacan montañas de origen volcánico, como las sierras San Andrés y Morelos.

Al extremo norte de la región Balsas se localiza la sierra Valle de Bravo; al este, las sierras Nanchititla y San Vicente; y al sur, las sierras La Goleta y Zacualpan. En su parte central se ubican los sistemas montañosos de la sierra de Temascaltepec. Esta parte del territorio estatal se caracteriza por una morfología accidentada con presencia de valles angostos, profundas cañadas y barrancos; estructuras rocosas de origen marino que al levantarse han sufrido fuertes plegamientos y fracturas.

- *Zonas áridas*

Las zonas áridas o de clima seco, semiáridas y subhúmedas secas se consideran frágiles debido a que en éstas se presenta la *desertificación*, la cual consiste en la degradación de la tierra como resultado de variaciones climáticas y las actividades humanas tales como el cultivo y el pastoreo excesivo, la deforestación y la falta de riego. Es importante aclarar que la desertificación no se refiere a la expansión de los desiertos existentes.

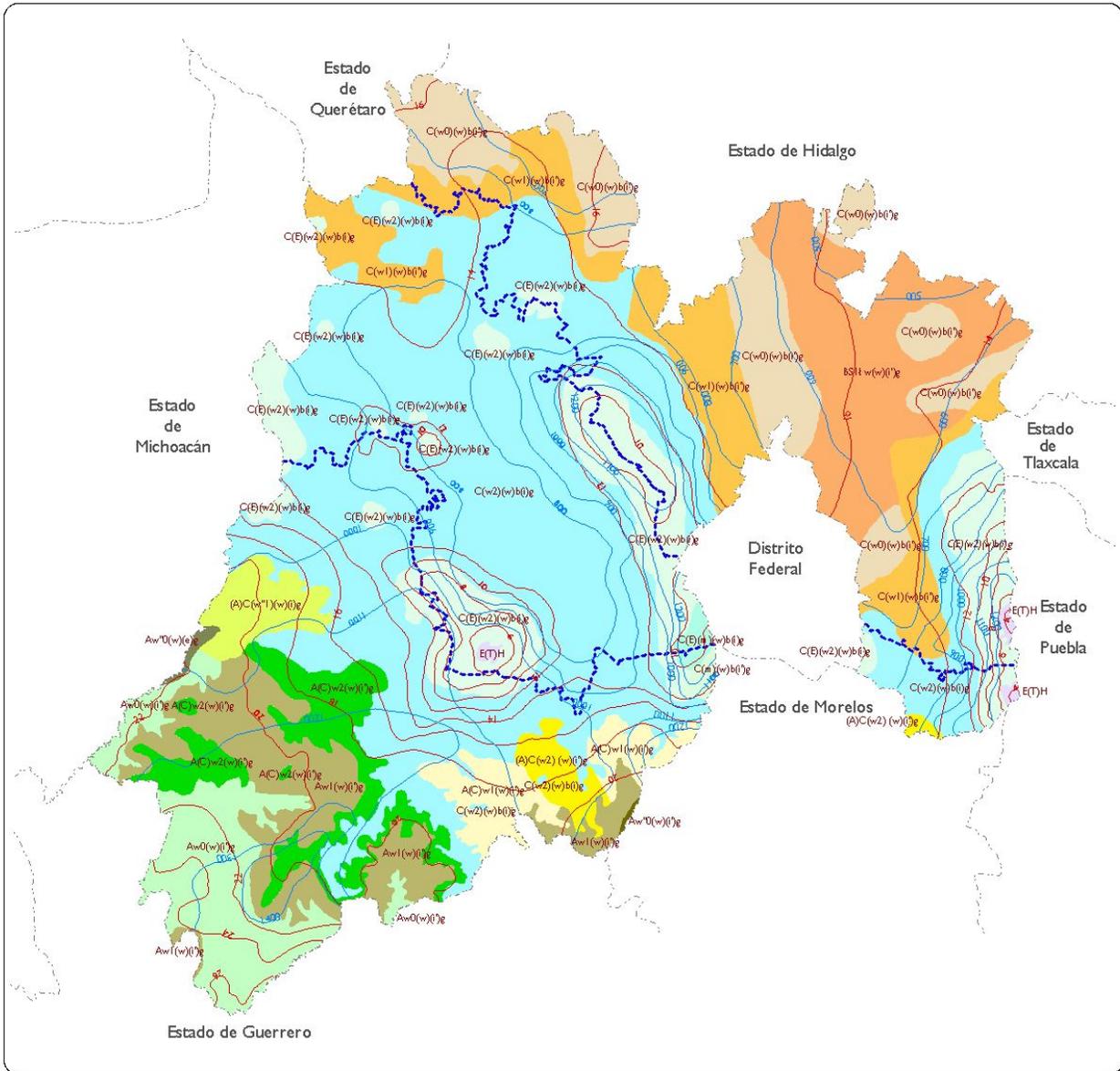
El cuadro 2.3 resume los tipos de clima presentes en la entidad. Al respecto, el clima seco semiárido comprende 5.73 % del territorio estatal, en la parte correspondiente a la región Pánuco, y se desarrolla en gran parte de los municipios de Acolman, Apaxco, Atenco, Axapusco, Chiautla, Chiconcuac, Papalotla, Ecatepec, Hueyoxotla, Jaltenco, Nextlalpan, Nopaltepec, Tecámac, Temascalapa, Teotihuacan, Tepetlaoxtoc, Tequixquiac, Texcoco, Tezayuca, Tonanitla y Zumpango (figura 2.4). Este tipo de clima –también llamado semiárido templado o seco estepario– es el menos seco de los secos, tiene lluvia invernal inferior a 5 %, reducida oscilación térmica y la temperatura más elevada ocurre antes del solsticio de verano.

Cuadro 2.3 Distribución porcentual de los climas del Estado de México

<i>Tipo</i>	<i>Símbolo</i>	<i>(%)</i>
Cálido subhúmedo con lluvias en verano	Aw	10.38
Semicálido subhúmedo con lluvias en verano	ACw	10.44
Templado subhúmedo con lluvias en verano	C(w)	61.77
Semifrío húmedo con lluvias en verano	C(E)(m)	0.64
Semifrío subhúmedo con lluvias en verano	C(E)(w)	10.89
Seco semiárido	BSIkw	5.73
Frío	E(T)	0.15

Los suelos localizados particularmente en zonas áridas pueden desarrollar un horizonte petrocálcico o *caliche*. Cuando los suelos son jóvenes, las sustancias como el calcio suelen estar dispersas uniformemente en todo su perfil. Cuando llueve, las sustancias son acarreadas y depositadas en zonas más profundas. Con el paso del tiempo se forma una franja u horizonte rica en calcio. Este elemento, mediante reacciones químicas se transforma en carbonato de calcio, el cual se cementa firmemente formando un estrato que asemeja a una roca: el caliche. Esta capa es impermeable y se localiza a unos pocos centímetros de la superficie.

Figura 2.4 Climas del Estado de México



SIMBOLOGIA

Clasificación Climática de Köppen Modificada por Enriqueta García

Denominación	Grupo de Climas	Coefficiente Prec/Temp	Grado de Humedad	Denominación	Grupo de Climas	Coefficiente Prec/Temp	Grado de Humedad
(A)C(w ¹)(w)(i)g	Semicálido	43.2 < P/T < 55.0	Subhúmedo	BSIkw(w)(i)g	Seco	> 22.9	Semiárido
(A)C(w ²)(w)(i)g	Semicálido	> 55.3	Subhúmedo	C(E)(m)(w)b(i)g	Semifrío	> 55.0	Húmedo
A(C)w1(w)(i)g	Semicálido	43.2 < P/T < 55.0	Subhúmedo	C(E)(w ²)(w)b(i)g	Semifrío	> 55.0	Subhúmedo
A(C)w2(w)(i)g	Semicálido	> 55.0	Subhúmedo	C(m)(w)b(i)g	Templado	> 55.0	Húmedo
Aw ⁰ (w)(e)g	Cálido	< 43.2	Subhúmedo	C(w ⁰)(w)b(i)g	Templado	< 43.2	Subhúmedo
Aw ⁰ (w)(i)g	Cálido	< 43.2	Subhúmedo	C(w ¹)(w)b(i)g	Templado	43.2 < P/T < 55.0	Subhúmedo
Aw ⁰ (w)(l)g	Cálido	< 43.2	Subhúmedo	C(w ²)(w)b(i)g	Templado	> 55.0	Subhúmedo
Aw1(w)(i)g	Cálido	43.2 < P/T < 55.0	Subhúmedo	E(T)H	Frío	Temperatura media anual -2 °C y 5 °C	

— 22 Temperatura media anual en °C
 — 4200 Precipitación media anual en mm.
 --- Límite de región hidrológica

Fuente: DGPCCA a partir de GEM (1993)

En las zonas áridas y semiáridas el clima favorece la acumulación de sales (*salinización*) por lo que es atribuible por completo a causas naturales. La salinización se asocia frecuentemente a la presencia de mantos freáticos elevados y salobres. En la zona del Eje Neovolcánico Transversal, las condiciones son mucho más húmedas, de modo que la salinización sólo acontece donde existen condiciones topográficas favorables que eviten el lavado natural de éstas, es el caso, por ejemplo, del ex lago de Texcoco. En otros sitios donde hay presencia de manantiales de aguas termales, las cuales contienen sulfatos y carbonatos de sodio, los suelos adyacentes a estos sitios generalmente son salinos.

3. Superficies Susceptibles a la Erosión y Desertificación según Región Hidrográfica

Existen diversas metodologías tanto de campo como de gabinete para determinar el deterioro del suelo debido a la erosión. Entre los métodos de gabinete está el uso de cartografía, fotografías aéreas e imágenes satelitales, así como programas de cómputo para la realización de cálculos basados en la fórmula universal de pérdida de suelo (véase por ejemplo a Nívar y Treviño, 1998; CENAPRED, 1994; SMAGDF, 1998; INE-SEMARNAT y UAC, 2007).

Para el presente trabajo, se identificaron las zonas susceptibles a la erosión en cada una de las tres regiones hidrográficas en que se divide el Estado de México, a saber: Pánuco, Lerma y Balsas, mediante el método deductivo de sobreposición y cuantificación de superficies a partir de la información georreferenciada del espacio que comprende el territorio mexiquense, disponible en formato magnético y ordenada por temática. En el ejercicio de análisis de la información se utilizó la carta digital del Inventario Nacional Forestal (INE, 2000), así como las cartas edafológica y climatológica estatales (GEM, 1993); y para la generación de la cobertura digital y cálculo de superficies se aplicó un sistema de información geográfica automatizado en ArcView.

Del Inventario Nacional Forestal se seleccionó la cobertura del territorio estatal correspondiente a unidades de suelo con los siguientes usos: (1) agricultura de temporal con cultivos anuales, (2) pastizal inducido, (3) áreas urbanas y (4) áreas sin vegetación aparente. Por una parte, se asume que los tipos de vegetación seleccionados están sujetos a una gran presión por las actividades humanas. Por otra parte, el área urbana –aunque ésta propiamente no presenta erosión– se consideró importante debido a que representa la pérdida del suelo debido a los cambios de uso de suelo, así como la presencia de caminos sin pavimentar, predios sin cubierta vegetal y asentamientos irregulares. Con relación a las áreas sin vegetación aparente, éstas incluyen las cimas de los volcanes Nevado de Toluca y Popocatepetl, así como sitios de inundación como El Caracol y el ex Lago de Texcoco.

El cuadro 3.1 muestra las superficies con potencial de erosión por región hidrográfica según los criterios seleccionados. En primer lugar, se observa que la superficie total susceptible a la erosión suma 11 129.17 km² lo que significa 50.2 % del territorio estatal. Por región hidrográfica, y según la extensión territorial de cada una, la superficie del Balsas representa 40 %; la del Lerma, 63 %; y la del Pánuco, 51.9 %.

Cuadro 3.1 Superficie susceptible a la erosión por región hidrográfica según uso de suelo km²

Uso de suelo	Región			Total
	Balsas	Lerma	Pánuco	
Agricultura de temporal con cultivos anuales	2 029.58	2 748.37	2 100.42	6 878.37
Pastizal inducido	1 396.63	824.89	1 093.43	3 314.95
Área sin vegetación aparente	15.35	5.64	83.71	104.69
Área urbana	34.37	122.55	674.24	831.16
Total	3 475.92	3 701.45	3 951.80	11 129.17

Fuente: DGPCCA, con información de INE (2000)

En segundo lugar, destaca que dentro del territorio mexiquense con susceptibilidad a la erosión, la zona agrícola representa 61.8 % y 31 % respecto al territorio estatal. Asimismo, el pastizal inducido involucra 29.8 % y 14.9 % del territorio, respectivamente.

En tercer lugar, se aprecia que Lerma es la región con más extensión agrícola de temporal, la cual equivale a 24.7 %; la región Balsas tiene la mayor superficie respecto a pastizal inducido (12.5 %); en la región Pánuco se presenta 0.8 % del área sin vegetación aparente y 6.1 % del área urbana.

Cabe recordar que la pérdida de suelo de una cuenca origina que sus áreas boscosas se reduzcan y que los campos de cultivo sean cada vez menos fértiles, siendo el abandono de esa actividad una de tantas consecuencias, lo que da lugar a que esos terrenos permanezcan en ocio, ocasionando que el suelo restante comience a erosionarse, lo que afecta a los ríos, presas y lagos que se ven azolvados, al igual que los poblados cuyo aire se contamina por la presencia de polvo y otras partículas finas en suspensión.

Las figuras 3.1, 3.2 y 3.3 brindan la distribución territorial de las cifras tabuladas en el cuadro 3.1, correspondiente a las zonas susceptibles a la erosión en cada una de las tres regiones hidrográficas del Estado de México.

Figura 3.1 Zonas con potencial de erosión en la región Pánuco según uso de suelo

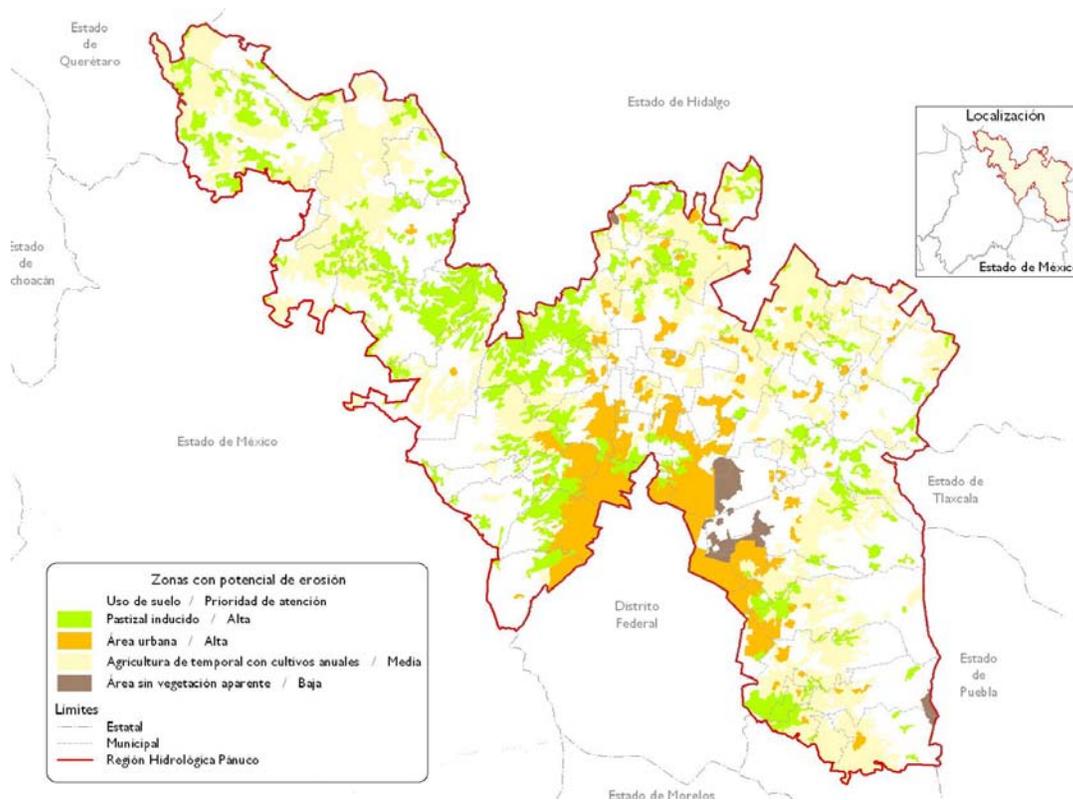


Figura 3.2 Zonas con potencial de erosión en la región Lerma según uso de suelo

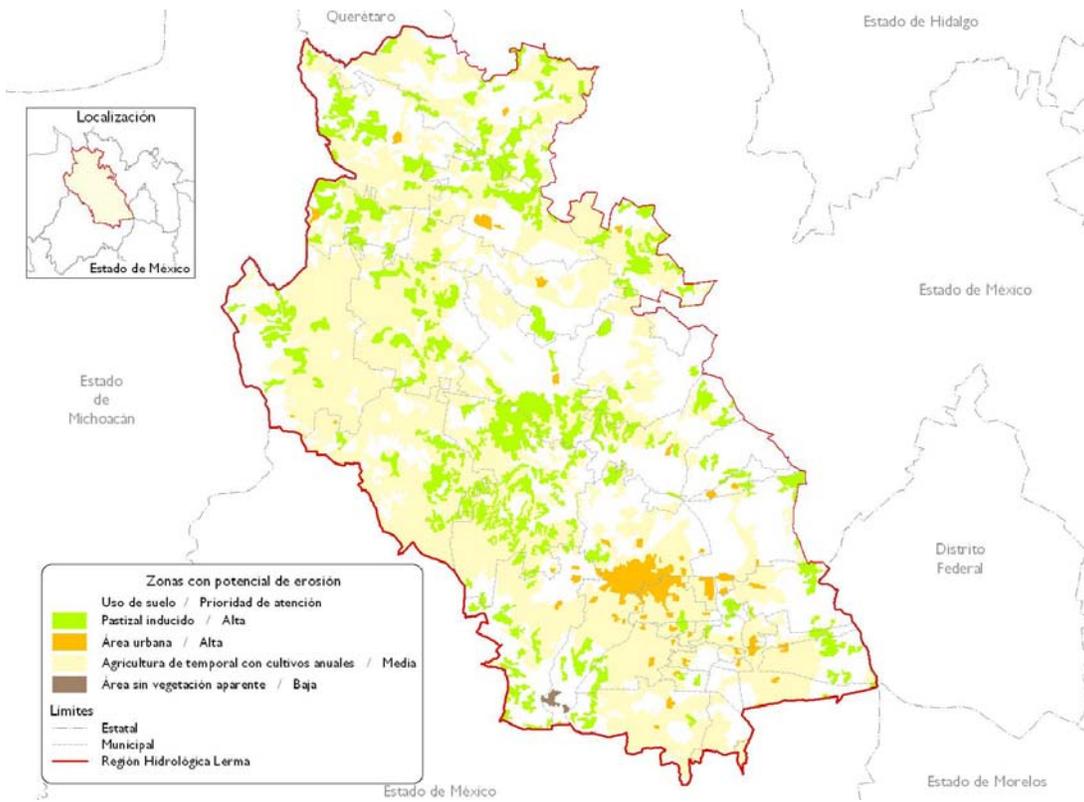
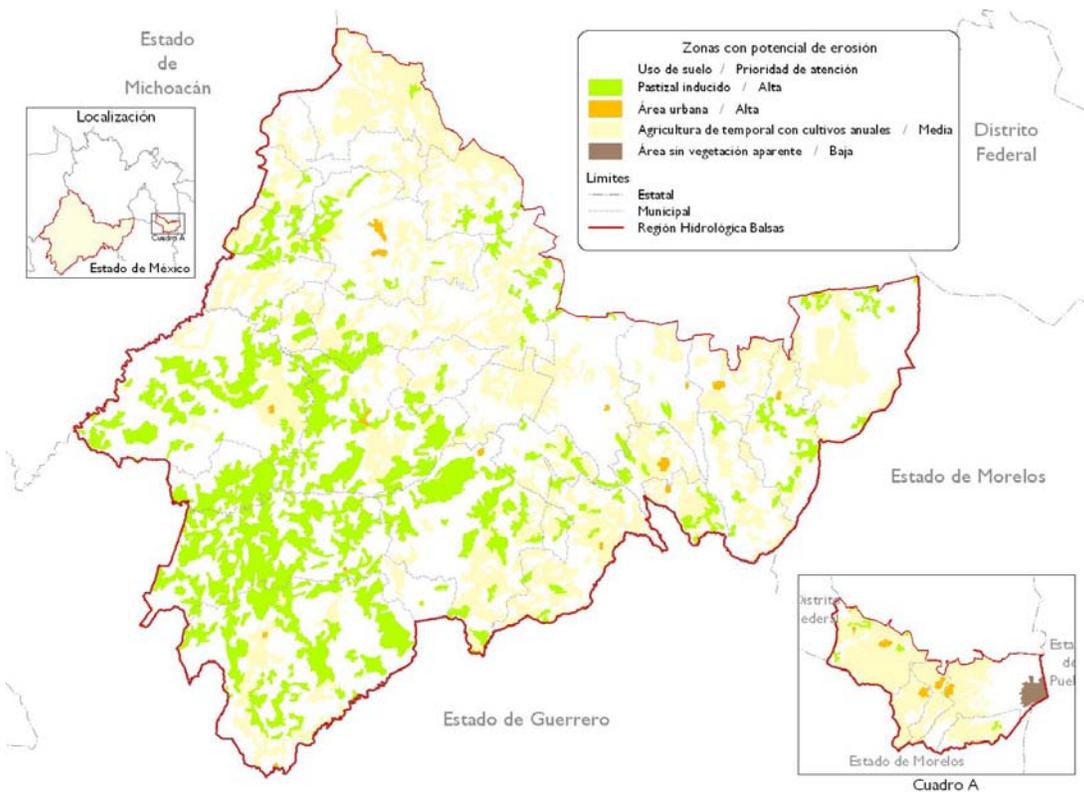


Figura 3.3 Zonas con potencial de erosión en la región Balsas según uso de suelo



A continuación, el cuadro 3.2 ofrece los resultados obtenidos a partir del análisis de la sobreposición de las cartas forestal nacional y edafológica estatal, considerando de la primera, la cobertura territorial de los cuatro usos de suelo ya mencionados, y de la segunda, los siete tipos de suelo que por sus propiedades físicas y químicas son más susceptibles a la erosión.

Cuadro 3.2 Superficie susceptible a la erosión por región hidrográficas resultante de la sobreposición de variables edafológicas
km²

Uso de suelo	Región			Total
	Balsas	Lerma	Pánuco	
Agricultura de temporal con cultivos anuales	1 837.14	2 364.84	1 695.98	5 897.95
Área sin vegetación aparente	15.35	5.58	11.16	32.09
Área urbana	20.56	119.01	375.92	515.49
Pastizal inducido	1 280.16	594.48	913.30	2 787.94
Total	3 153.21	3 083.91	2 996.35	9 233.48

Fuente: DGPCCA, con información de INE (2000) y GEM (1993)

Debido a que sólo se consideran los tipos de suelo con la mayor susceptibilidad a la erosión, es de esperar una reducción de la superficie con potencial erosivo. De esta forma, el área total susceptible a la erosión pasa de 11 129.17 km² a 9 233.48 km², equivaliendo a 41.6 % del territorio estatal. Por región hidrográfica, y tomando la extensión territorial de cada una de las tres, la superficie del Balsas comprende 36.3 %; la del Lerma, 52.5 %; y la del Pánuco, 39.3 %.

La zona agrícola ahora representa 63.9 % de la superficie susceptible a la erosión y 26.6 % respecto al territorio estatal. Asimismo, al pastizal inducido le corresponde 30.2 % y 12.6 %, respectivamente.

Se aprecia que la región Lerma mantiene la mayor extensión agrícola de temporal, con 25.6 %; la región Balsas tiene la mayor superficie respecto a pastizal inducido (13.9 %) y áreas sin vegetación aparente (0.2 %); y la región Pánuco presenta 4.8 % del área urbana.

Las figuras 3.4, 3.5 y 3.6 ofrecen los mapas con la distribución territorial de las zonas susceptibles a la erosión para cada una de las tres regiones hidrográficas que resultaron del análisis de sobreposición del inventario forestal y la carta edafológica.

Figura 3.4 Zonas con potencial de erosión en la región Pánuco según uso y tipo de suelo

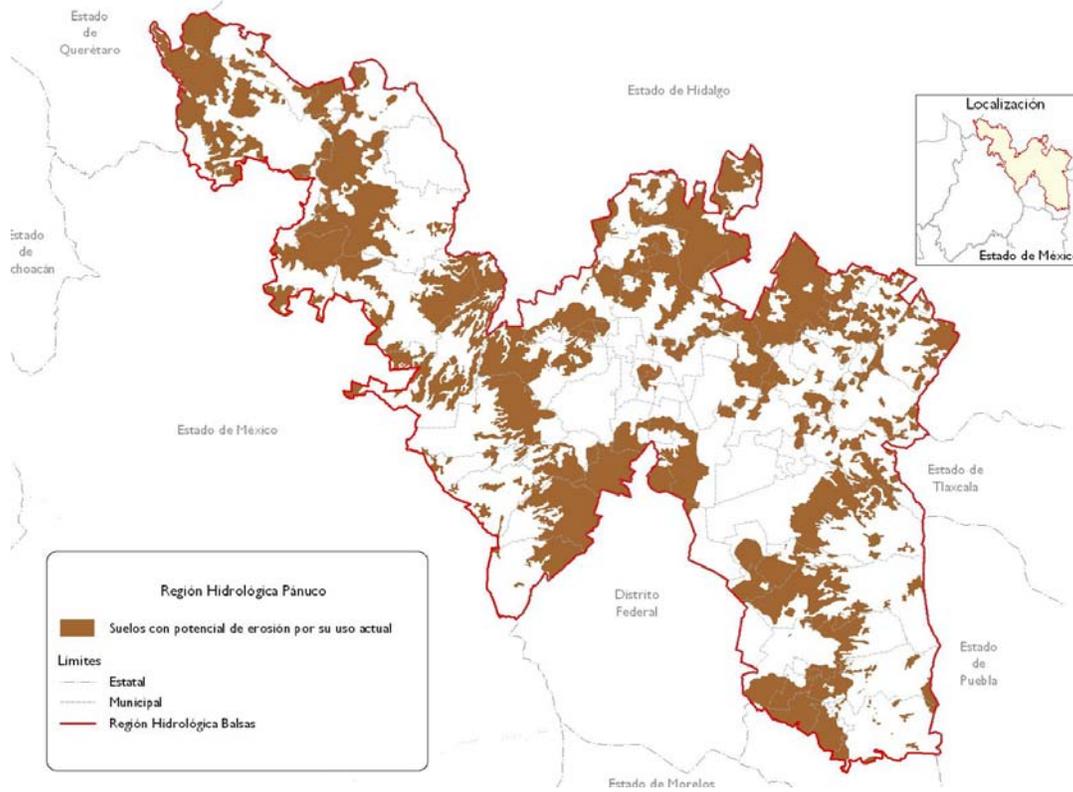


Figura 3.5 Zonas con potencial de erosión en la región Lerma según uso y tipo de suelo

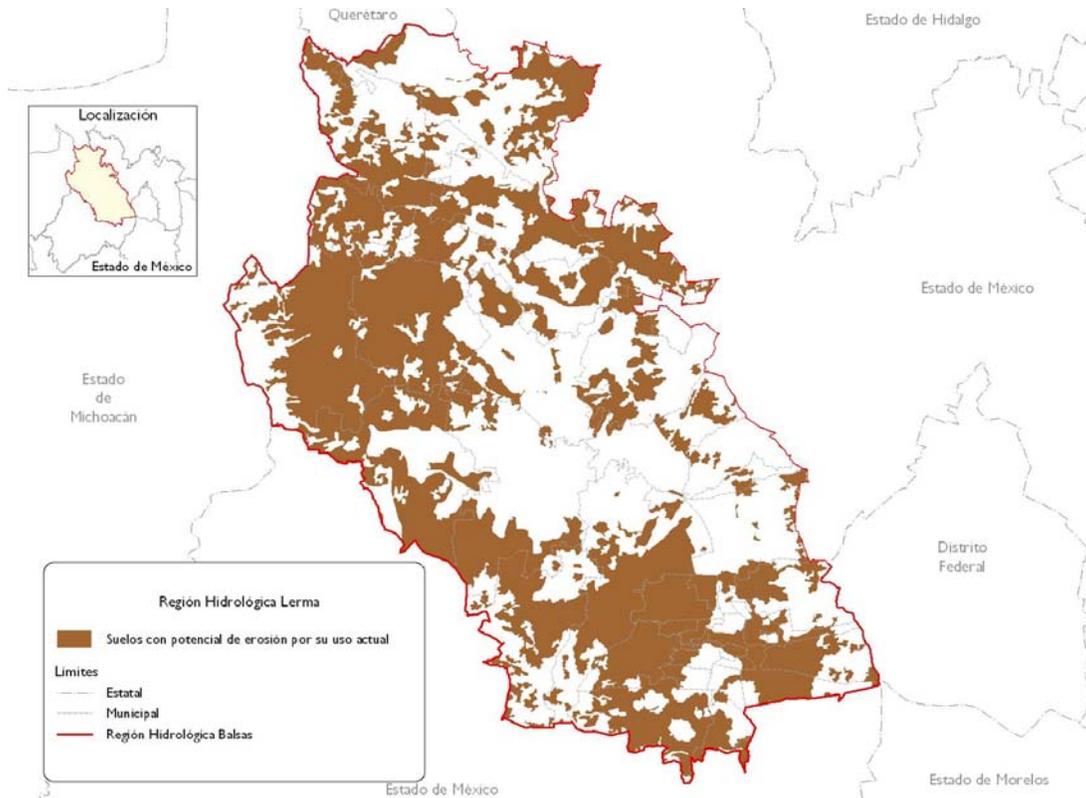
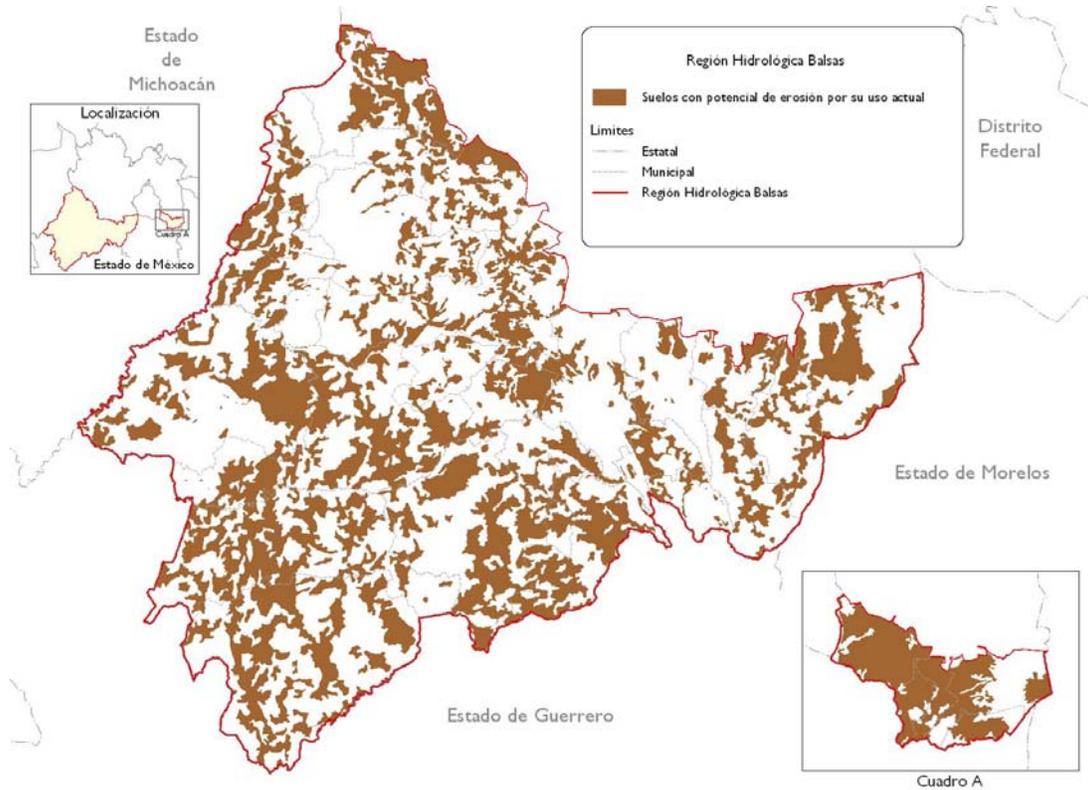


Figura 3.6 Zonas con potencial de erosión en la región Balsas según uso y tipo de suelo



- *Zona frágil y potencial de desertificación*

Por último, con la finalidad de identificar zonas susceptibles a la desertificación, se efectuó una segunda sobreposición utilizando los criterios del inventario forestal y de la carta edafológica con la carta climatológica de la entidad. De ésta última se seleccionó únicamente los climas secos, los cuales tienen una clara presencia en la porción noreste de la entidad, esto es, en la región Pánuco. Cabe recordar que la desertificación por erosión hídrica se presenta principalmente en zonas semiáridas y subhúmedas secas, en tanto que la desertificación por erosión eólica es más común en zonas áridas.

El cuadro 3.3 incluye el resultado cuantificado del análisis para definir la superficie susceptible a los procesos de desertificación en la entidad, particularmente al interior de la región Pánuco. Si se considera que esta región tiene una extensión territorial de 7 617.77 km² entonces la zona sujeta a deterioro representa 25.2 % (8.7 % con respecto al territorio estatal), es decir, que en una cuarta parte de esta región hidrográfica y en poco menos de la décima parte de la entidad pueden suceder problemas de desertificación.

Cuadro 3.3 Zonas susceptibles a la desertificación en la región Pánuco

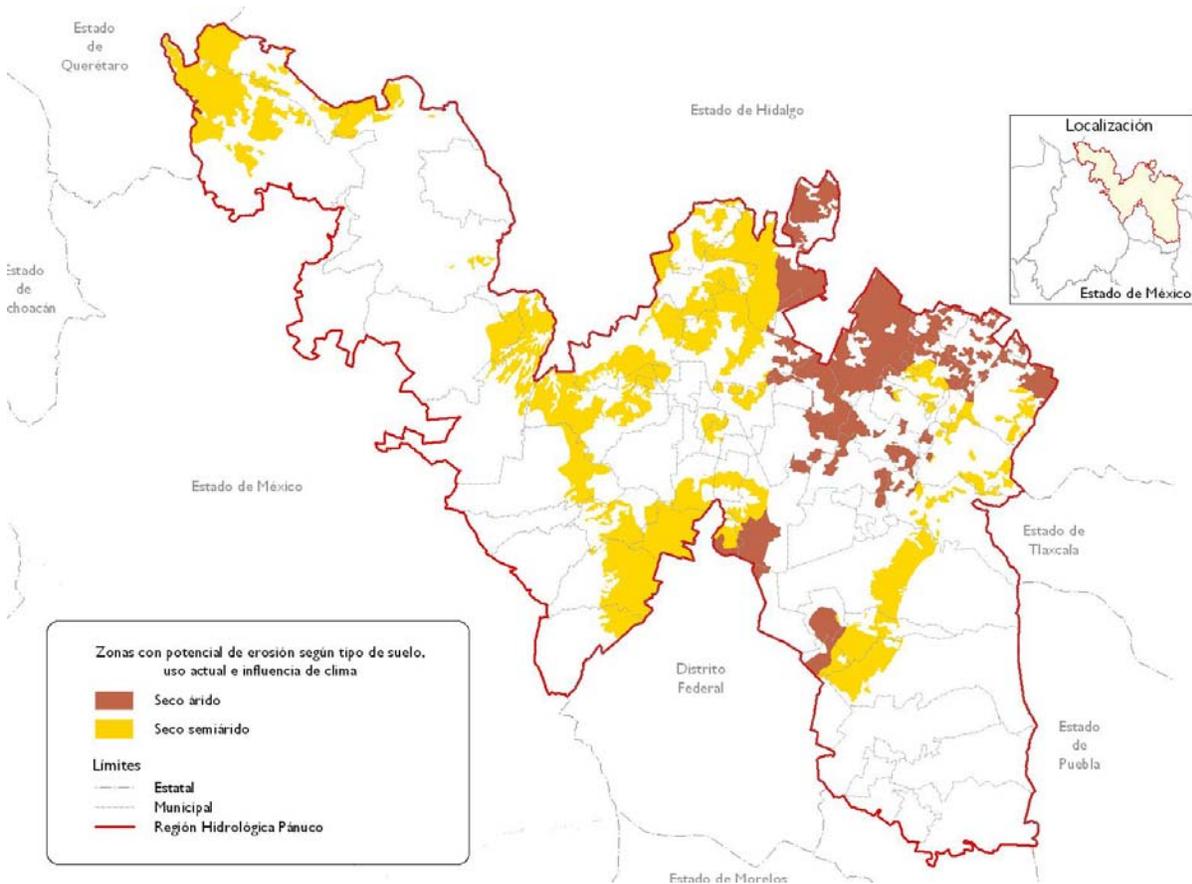
Clima	Superficie (km²)
Seco árido	582.23
Seco semiárido	1 340.31
Total	1 922.54

Fuente: DGPCCA, con información de INE (2000) y GEM (1993)

Derivado de los resultados obtenidos de este segundo proceso de análisis, del total de la superficie susceptible a desertificación en la región Pánuco, 69.7 % corresponde a clima semiárido y 30.3 % al árido.

La figura 3.7 ilustra la distribución territorial de las zonas susceptibles según el tipo de clima y suelo susceptible a la erosión, en donde se aprecia claramente que las zonas más críticas, por su condición de aridez, se localizan hacia los límites del Estado de México con el estado de Hidalgo, esto es, en la porción noreste de la región del Pánuco. Hacia el interior de la región y los límites con el estado de Querétaro se localizan los suelos bajo condiciones semiáridas.

Figura 3.7 Zonas susceptibles a la desertificación



4. Técnicas para la Recuperación de Suelos

Las prácticas más comunes empleadas en la conservación del suelo y agua son las llamadas prácticas mecánicas y vegetativas. Entre las primeras se encuentran, por ejemplo, las presas filtrantes de piedra acomodada, de ramas y de gavión (figura 4.1); el cabeceo de cárcavas (figura 4.2); las distintas modalidades de terrazas (figura 4.3) y las zanjas derivadoras de escorrentía y roturación (figura 4.4).

Figura 4.1. Presa de malla ciclónica



Fotografía: CONAFOR (2007) Gerencia de Suelos Forestales

Dentro de las prácticas vegetativas está la rotación de cultivos, la reforestación, los cultivos de cobertura, cortinas rompe-viento, material muerto acomodado en laderas y sistemas agroforestales, por mencionar algunas (figuras 4.5 y 4.6).

A continuación se resumen algunas de estas técnicas para la recuperación de suelos descritas por SEGEM (1995), IIDT (2002), PROBOSQUE (2006), CONAFOR (2007) y CENAPRED (s. f.), y que han sido implementadas por las autoridades gubernamentales correspondientes, en diferentes sitios del Estado de México, como parte de programas y políticas de gestión para mitigar los diferentes grados de erosión que presenta, tal es el caso de los esfuerzos realizados en el Parque Estatal Sierra de Guadalupe, en la ZMVM, y en el Parque Nacional Nevado de Toluca, en la ZMVT.

1. *Construcción de terrazas.*- Son estructuras de defensa, que generalmente consisten en una zona de captación y un promontorio, que se construyen transversalmente a la pendiente del terreno. Tienen como función principal reducir la longitud de las laderas y disminuir la pendiente del terreno para regular los escurrimientos superficiales. Por su función, las terrazas se clasifican en dos tipos: de *absorción*, generalmente trazadas a nivel o en contra-pendiente; y las de *desagüe*, con pendientes entre 0.1 % y 0.2 %.

Figura 4.3. Terraza de formación paulatina



Fotografía: CONAFOR (2007) Gerencia de Suelos Forestales

2. *Rectificación de cárcavas.*- Las cárcavas presentan un crecimiento constante en área y profundidad hacia aguas arriba, disminuyendo con esto el área útil del suelo y en algunos casos poniendo en peligro las construcciones que se encuentran en las zonas vecinas. Las acciones para rectificar las cárcavas son la estabilización de las laderas, mediante reforestación o cubiertas vegetales, la rectificación del fondo de la cárcava, a través del empleo de represas y la derivación del flujo principal con estructuras de drenaje por fuera de la cárcava.

Figura 4.2. Cabeceo de cárcavas



Fotografía: CONAFOR (2007) Gerencia de Suelos Forestales

3. *Rectificación de cauces.*- Como el principal agente erosivo es el agua, su protección se obtiene disminuyendo la energía de los escurrimientos. Esto se logra construyendo pequeñas represas a lo largo del cauce, con lo cual se puede disminuir la velocidad del agua y se favorece el depósito del material sólido. Se recomienda construirlas en secuencia, empezando desde aguas abajo. Cuando se ha llenado una represa se construye la otra, y así sucesivamente.

Figura 4.4. Roturación en suelos calcáreos compactados



Fotografía: CONAFOR (2007) Gerencia de Suelos Forestales

4. *Reforestación.*- Sin lugar a dudas esta medida es la mejor opción para la conservación y rehabilitación del suelo. Sin embargo en la práctica, y debido a la constante presión socio-económica por disponer de tierras de cultivo, dicha solución sólo puede emplearse en pocos casos, o cuando el problema de erosión ha llegado a sus últimas consecuencias (véase el cuadro 4.1 respecto a las especies arbóreas recomendadas para reforestar).

Figura 4.5. Prácticas vegetativas: reforestación



Fotografía: PROBOSQUE

5. *Cubiertas naturales o artificiales.*- Después de la reforestación, esta técnica es la más recomendada para el control de la erosión laminar. Existe una gran variedad de tipos de cubiertas para suelos, tales como: pastos, composta, estiércol, paja de arroz, residuos del cultivo anterior y productos sintéticos (polietileno, emulsiones asfálticas y polisacáridos), entre otros. El uso de cada tipo de cubierta dependerá de su disponibilidad, costo y práctica de cultivo.

Figura 4.6. Prácticas vegetativas: cortina rompe-viento



Fotografía: CONAFOR (2007) Gerencia de Suelos Forestales

6. *Sistemas agroforestales.*- Una práctica que ha cobrado impulso en los últimos años, es la denominada agroforestal, que básicamente consiste en sembrar barreras de árboles o arbustos, espaciadas unos metros (4 m a 10 m), y en el espacio que queda entre ellas se siembran cultivos.
7. *Cultivo en contorno y en fajas.*- El cultivo en contorno es aquel que se realiza siguiendo las curvas de nivel del terreno. Cuando además los cultivos se disponen en bandas o en fajas alternadas, se denominan cultivo de fajas en contorno. Existen otros tipos de variantes de cultivo, pero el objetivo principal es reducir la velocidad del escurrimiento superficial.

4.1 Especies Vegetales Sugeridas para Reforestación

Antes de realizar cualquier programa de reforestación es necesario considerar las condiciones agroecológicas de la zona a restaurar, principalmente la latitud y altitud del sitio, su exposición con relación al sol, la calidad del suelo (textura y profundidad) y el clima predominante (temperatura y precipitación). A partir de esto, se deben de seleccionar las especies adecuadas, tomando en cuenta las características de crecimiento, capacidad de desarrollo radical, vigor, compatibilidad de asociación con otras especies, resistencia de plagas y enfermedades.

También es importante considerar que las especies vegetales utilizadas en la plantación cuenten con características morfológicas que impliquen un uso específico o futuro. Tomando como referencia el Manual de Reforestación (PROBOSQUE, 2006), el cuadro 4.1 enlista las especies arbóreas más apropiadas para reforestar dentro de la entidad mexicana.

Cuadro 4.1 Listado de especies arbóreas recomendadas para la reforestación

Nombre científico (nombre común)

<i>Pinus ayacahuite</i> (Acalorote)	<i>Pinus halepensis</i> (Pino)
<i>Pinus teiophylla</i> (Pino chino)	<i>Abies religiosa</i> (Oyamel)
<i>Pinus tenuifolia</i> (Pino)	<i>Cupressus lindleyi</i> (Cedro blanco)
<i>Pinus patula</i> (Pino colorado)	<i>Taxodium mucronatum</i> (Ahuehuete)
<i>Pinus oocarpa</i> (Pino prieto)	<i>Juniperus monticola</i> (Enebro)
<i>Pinus teocote</i> (Ocote)	<i>Juniperus deppeana</i> (Enebro)
<i>Pinus Pringlei</i> (Pino)	<i>Eucalyptus globulus</i> (Eucalipto)
<i>Pinus montezumae</i> (Pino real)	<i>Eucalyptus carnaldulensis</i> (Eucalipto)
<i>Pinus pseudostrobus</i> (Pino blanco)	<i>Casuarina equisetifolia</i> (Casuarina)
<i>Pinus hartwegii</i> (Pino prieto)	<i>Quercus rugosa</i> (Encino)
<i>Pinus rudis</i> (Ocote pardo)	<i>Quercus laurina</i> (Encino)
<i>Pinus douglasiana</i> (Ocote lacio)	<i>Quercus scytophylla</i> (Encino)
<i>Pinus michoacana</i> (Pino lacio)	<i>Enterolobium cyclocarpum</i> (Parota)
<i>Pinus herrerae</i> (Pino chino)	<i>Swietenia humilis</i> (Caobilla)
<i>Pinus lawsoni</i> (Ocote)	<i>Acacia guatemalensis</i> (Espino herrero)
<i>Pinus cembroides</i> (Pino piñonero)	<i>Amphipterygium adstringens</i> (Cuachalalate)
<i>Pinus greggii</i> (Pino ocote)	<i>Lysiloma acapulcensis</i> (Tepehuaje)
<i>Pinus radiata</i> (Ocote)	<i>Byrsonima crassifolia</i> (Nanche)

Fuente: PROBOSQUE (2006)

Además, es conveniente que la planta provenga de viveros cercanos a los terrenos donde se plantará. Lo mejor es seleccionar especies de un clima similar al del sitio que se reforestará. Ahora bien, si el sitio de la plantación es un área seca, se buscarán especies resistentes, las cuales deberán ser *endurecidas* en el vivero, para aumentar su sobrevivencia, para lo cual se pueden utilizar fertilizantes ricos en fósforo y potasio.

- *La importancia de las especies vegetales en el control de la erosión*

Muchas actividades humanas retiran la capa protectora de vegetación, produciendo una erosión más acelerada, lo que conlleva a que el suelo pierda sus nutrimentos y sea infértil e inservible. Una zona sin árboles corre mayor riesgo de erosionarse, debido a que éstos absorben el agua y en su ausencia ésta se va en su mayor parte sin ser absorbida y llevándose con sigo la arena de la tierra. Además, las hojas juegan un papel importante en la erosión, por ejemplo, un arbusto grande con hojas abundantes brinda más protección al suelo contra el golpeteo de las gotas de lluvia. Las gotas al colisionar con una hoja se dividen y se dispersan en gotas más pequeñas, por el contrario, al impactar con el suelo éstas desquebrajan el suelo por su efecto corrosivo. Asimismo, la vegetación controla la velocidad de la corriente de agua: entre más juntas estén los tallos de las plantas, la velocidad de la corriente del agua será menor.

Conclusiones

El suelo es uno de los recursos naturales más importantes, ya que de su calidad y condiciones depende el buen estado de los hábitats silvestres, el ciclo natural del agua, las actividades agrícolas, ganaderas, forestales y urbanas. Sin embargo, en el Estado de México, al igual que en el resto del país, este recurso enfrenta una situación adversa de deterioro y contaminación por desconocimiento del hombre sobre los límites que se tienen para su aprovechamiento, la aplicación de técnicas apropiadas y los beneficios que puede brindar la instrumentación de políticas sostenibles.

La degradación del suelo ocurre por diferentes procesos, siendo los más importantes la erosión eólica e hídrica. Cuando la erosión es severa, dificulta el desarrollo de la vegetación; afecta de manera importante la disponibilidad y calidad del agua; contribuye con el azolve de cuerpos de agua artificiales y naturales; ocasiona la disminución de la recarga de mantos acuíferos; en ocasiones se ve comprometida la seguridad humana debido a derrumbes, inundaciones y daños a obras de infraestructura, asimismo, los suelos erosionados se convierten en una fuente natural de contaminación del aire debido a la emisión de partículas las cuales pueden afectar la salud humana.

Para el Estado de México se ha identificado que la causa principal de la erosión del suelo se debe a la deforestación asociada a los cambios del uso de suelo y actividades pecuarias. Otras causas de deterioro están exclusivamente ligadas con las actividades agrícolas, específicamente, con prácticas inadecuadas de producción, como el riego excesivo, la quema de residuos de cosecha, el exceso de labranza y la falta de prácticas de conservación de suelo y agua.

De los 13 tipos de suelos presentes en la entidad, siete se consideran prioritarios para su manejo y conservación debido a que son particularmente susceptibles a la erosión. Estos suelos son andosol, cambisol, feozem, leptosol, luvisol, planosol y regosol.

Los sistemas montañosos y sitios áridos son considerados por la Agenda XXI como zonas frágiles. Al respecto, en 76.1 % del relieve mexiquense predominan sierras y lomeríos; y en 5.7 % del territorio se manifiesta el clima seco, que a su vez comprende 69.7 % semiárido y 30.3 % árido.

A pesar de que para la entidad no se reportan problemas de desertificación, se han identificado zonas susceptibles a ese proceso de deterioro, particularmente en 21 municipios del Estado de México localizados en la parte noreste de la región hidrográfica Pánuco.

Con relación a las emisiones de partículas PM_{10} provenientes de los suelos erosionados, y teniendo en cuenta a los inventarios de emisiones, al menos en los MC-ZMVM se observa una tendencia descendente en el periodo 1994-2004, pasando de 1.6 toneladas/año a 1.1 toneladas/año, asimismo, su participación relativa ha disminuido.

Los MC-ZMVM muestran una relación de emisión de 1 119.3 kg/km^2 de PM_{10} , en tanto, que para la ZMVT es de 1 162.2 kg/km^2 de PM_{10} . Esto permite determinar que la erosión en la ZMVT es más seria que en los MC-ZMVM, pues a pesar de contar con menos superficie, tiene más emisión de partículas por unidad de superficie.

La erosión del suelo, natural o inducida por el hombre, está presente en la entidad en diferente magnitud. En el presente trabajo se identificaron 9 233.48 km² correspondientes a la superficie susceptible a procesos de erosión, lo que representa 41.04 % del territorio estatal. Por región hidrográfica se estimó que 3 153.21 km² pertenecen a la región del Balsas; 3 083.91 km² a la del Lerma y 2 996.35 km² a la del Pánuco. No obstante, la región Lerma tiene, proporcionalmente a su territorio, la mayor superficie susceptible a la erosión, hasta en 63 %.

En el contexto estatal, la agricultura de temporal tiene la superficie más grande susceptible a la erosión, además, ésta representa 31 % mientras que la superficie de la agricultura de riego 16.2 %.

Por otra parte, se determinó que 25.2 % de la superficie territorial de la región Panuco, esto es, una cuarta parte de esta región hidrográfica, puede presentar problemas de desertificación.

Existen diversas técnicas para la conservación del suelo que igual funcionan para controlar o mitigar los procesos erosivos, estas prácticas pueden ser tanto mecánicas como vegetativas. Sin embargo, para que cada una de ellas pruebe su efectividad se deben seguir ciertos lineamientos y evaluaciones técnicos para determinar la más adecuada.

El suelo ha sido hasta hoy un patrimonio subestimado, un recurso que se ha malgastado y cuya pérdida pone en peligro la viabilidad del desarrollo del Estado de México y sus municipios. En este sentido, es prioritario y urgente situar la degradación del suelo y la desertificación como problemas medulares del desarrollo sostenible.

La sociedad mexiquense tiene el compromiso de participar en la conservación del recurso suelo y puede hacerlo desde varios frentes; uno de ellos es conociendo o informándose acerca del problema de la erosión y la desertificación del suelo y sus consecuencias; otro puede consistir en participar en acciones de prevención de la erosión y desertificación, así como en actividades de conservación de la vegetación, o bien en la denuncia de los cambios del uso de suelo y de la contaminación de éste.

En la DGPCCA falta aún mucho por considerar acerca de la erosión del suelo y sus implicaciones en la calidad del aire. Este primer ensayo, aparte de la experiencia adquirida, deja abiertas importantes cuestiones para continuar los trabajos en materia de inventarios de emisiones de fuentes erosivas a escala estatal, así como para promover la realización de estudios técnicos que evalúen el origen (natural o antropogénico) y la composición química de las PM₁₀ presentes en las zonas metropolitanas de la entidad. Al final se espera que todo esto permitirá contribuir a reforzar las medidas consideradas en los Proaires correspondientes, para abatir las emisiones contaminantes, la cuales tienen como principal objetivo, la protección de la salud de los habitantes del Estado de México.

Bibliografía

- CENAPRED [Centro Nacional para la Prevención de Desastres] (1994). Erosión. Fascículo 8. Secretaría de Gobernación. México, D. F.
- CENAPRED (s. f.). Erosión ¿Qué hacer en caso de Erosión? En: CENAPRED <www.cenapred.gob.mx/es/Investigacion/RHidrometeorologicos/FenomenosMeteorologicos/Erosion> (21 de mayo de 2008)
- CONAFOR [Comisión Nacional Forestal] (2007). *Protección, restauración y conservación de suelos forestales, manual de obras y prácticas* (3ª ed.). Autor, México.
- DGEPE [Dirección General de Estudios y Proyectos Ecológicos] (1993). *Diagnóstico ambiental permanente del Estado de México*. Secretaría de Ecología del Gobierno del Estado de México. Informe técnico preliminar. Estado de México, México.
- DGPCCA [Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica] (2007). *Inventario de emisiones a la atmósfera de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca 2002*. Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Estado de México. Informe técnico DDA/07. México.
- DGPCCASR [Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación del Agua, Suelo y Residuos] (2008, 4 de octubre) Comentarios y observaciones al documento “Bases de diagnóstico: identificación de zonas susceptibles a la erosión en el Estado de México”. Oficio n.º 212120000/0769/2008, Tlalnepantla de Baz, Estado de México.
- GEM [Gobierno del Estado de México] (1993). *Atlas general del Estado de México*. Secretaría de Finanzas y Planeación. México.
- GEM (1997). *Aire Limpio: programa para el valle de Toluca 1997-2000*. Secretaría de Ecología. México.
- González, E. J. (2005). Erosión: la importancia de la conservación del suelo. En: Asociación Española Agricultura de Conservación / Suelos Vivos <www.aeac-sv.org> (21 de mayo de 2008).
- IIIGCEM [Instituto de Información e Investigación Geográfica, Estadística y Catastral del Estado de México] (s. f.). Información geográfica básica del Estado de México. En: Secretaría de Finanzas <www.edomexico.gob.mx/igecem/templates/GeoInf.htm> (27 de mayo de 2008).
- INE [Instituto Nacional de Ecología] (2000). *Inventario Nacional Forestal* [Formato electrónico].
- INE-SEMARNAT y Universidad Autónoma de Chapingo [UAC] (2007) *Formulación de indicadores para calcular y monitorear la desertificación en México*. SEMARNAT. México.
- INEGI [Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática] (1989). *Guía para la interpretación de cartografía–Edafología*. Autor. México.

- INEGI y SEMARNAP (1998) *Estadísticas del medio ambiente–México 1997*. Autor. México.
- INEGI y SEMARNAP (2000) *Estadísticas del medio ambiente–México 1999*. Tomo I. Autor. México.
- IIDT [Instituto Internacional de Dasonomía Tropical] (2002). *Manual de reforestación para América tropical*. Servicio Forestal del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Puerto Rico.
- Návar, J.; Treviño, E. (1998) Estimación del tonelaje de partículas de suelo que potencialmente contribuyen a la contaminación del aire en el área metropolitana de Monterrey, México. *Terra-Latinoamericana*, 16 (1), 21-31.
- ONU [Organización de las Naciones Unidas] (2007). Desertificación. En: Centro de Información Naciones Unidas <www.cinu.org.mx/temas/des_sost/desert.htm> (21 de mayo de 2008).
- PMA [Portal del Medio Ambiente] (2004). Procesos de la desertificación. En: PMA <www.portaldelmedioambiente.com/html/Articulos/desertificacion.asp#procesos> (21 de mayo de 2008).
- PROBOSQUE [Protectora de Bosques] (2006). *Manual de reforestación*. Secretaría de Desarrollo Agropecuario. México.
- Schoijet, M. (2005). Desertificación y tormentas de arena. *Región y Sociedad*, 17(32), 167-187.
- SEGEM [Secretaría de Ecología del Gobierno del Estado de México] (1995). *Prácticas de conservación del suelo y el agua para un desarrollo sustentable*. Autor. México.
- SEGEM (2005). *Inventario de emisiones a la atmósfera de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca 2000*. Autor. México.
- SEMARNAT [Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales] (2003). *Informe de la situación del medio ambiente en México 2002 – compendio de estadísticas ambientales*. Autor. México, D. F.
- SMAGDF [Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal] (2001a). *Inventario de emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México 1998*. Autor. México, DF.
- SMAGDF (2001b). *Inventario de emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México 2000*. Autor. México, DF.
- SMAGDF (2005). *Inventarios de emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México 2002*. Autor. México, DF.
- SMAGDF (2006). *Inventarios de emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México 2004*. Autor. México, DF.

Créditos técnicos

Lic. Francisco Pablo Escamilla Báez

Encargado del Departamento de Diagnóstico

Elaboración e integración:

Lic. Gabriel Zavaleta Mondragón

Diagnóstico Ambiental

Geog. Juan Conrado Quezada García

Sistema de Información Geográfica

Para más información acudir a:

Secretaría del Medio Ambiente
Dirección General de Prevención y
Control de la Contaminación Atmosférica
Departamento de Diagnóstico
Vía Gustavo Baz Prada 2160, 2do. piso
Col. Viveros del Río, Tlalnepantla de Baz
Estado de México. C. P. 54060
Tels. (55) 53 66 82 64 y (55) 53 66 82 70



GOBIERNO DEL
ESTADO DE MÉXICO