



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERIA CIVIL-HIDRAULICA

ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL EROSIVO DE LA LLUVIA
DEL ESTADO DE PUEBLA

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRA EN INGENIERÍA

PRESENTA:
YOLANDA SWIETENIA TOPETE BUSTAMANTE

TUTOR PRINCIPAL
DR. CARLOS AGUSTIN ESCALANTE SANDOVAL
FACULTAD DE INGENIERIA

MÉXICO, D. F. AGOSTO 2013

JURADO ASIGNADO:

Presidente: M.I. Víctor Franco

Secretario: Dra. Lilia Reyes Chávez

Vocal: Dr. Carlos Agustín Escalante Sandoval

1 er. Suplente: M.I. Alba Beatriz Vázquez González

2 do. Suplente: M.I. Marco Tulio Mendoza Rosas

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: FACULTAD DE INGENIERIA

TUTOR DE TESIS:

DR. CARLOS AGUSTÍN ESCALANTE SANDOVAL

FIRMA

CONTENIDO

Resumen -----	1
Abstract -----	2
Introducción -----	3
1. El Suelo -----	6
1.1 Definición -----	6
1.2 Degradación de los suelos en México-----	9
1.2.1 Degradación por desplazamiento de material-----	11
1.2.2 Degradación por deterioro interno -----	11
1.2.3 Evaluación del proceso de degradación -----	12
1.3 Desertificación en México -----	20
1.4 Deforestación en México -----	22
1.5 Conservación y recuperación de los suelos -----	25
1.6 Prácticas y obras para el aprovechamiento sustentable del suelo -----	27
1.6.1 Prácticas vegetativas -----	29
1.6.2 Obras-----	32
2. Análisis de frecuencias de eventos extremos -----	37
2.1 Estadísticos muestrales -----	37
2.2 Periodo de retorno-----	38
2.3 Pruebas de homogeneidad e independencia -----	39
2.4 Teoría distribucional-----	44
3. Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE) -----	45
4. Zona de Estudio-----	50
5. Conclusiones y Recomendaciones -----	67
Referencias -----	68

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Distribución espacial de los tipos de suelo en México. -----	8
Figura 1.2. Composición relativa de los suelos en México-----	8
Figura 1.3. Superficie relativa cubierta por los principales grupos de suelo en México (2007) ----	9
Figura 1.4. Porcentaje del territorio nacional afectado por tipo de proceso de degradación-----	13

Figura 1.5. Porcentaje del nivel de degradación de los suelos en México -----	13
Figura 1.6. Porcentaje de la superficie del país por nivel de afectación provocada por la erosión hídrica. -----	14
Figura 1.7. Porcentaje de la superficie afectada por erosión hídrica de acuerdo con su mecanismo de generación. -----	14
Figura 1.8. Distribución espacial de la pérdida de suelo provocada por erosión hídrica. -----	15
Figura 1.9. Porcentaje de la superficie del país por nivel de afectación provocada por la erosión	15
Figura 1.10. Porcentaje de la superficie afectada por erosión eólica de acuerdo con su mecanismo de generación. -----	16
Figura 1.11. Distribución espacial de la pérdida de suelo provocada por erosión hídrica. -----	16
Figura 1.12. Porcentaje de la superficie del país por nivel de afectación provocada por la erosión química. -----	17
Figura 1.13. Porcentaje de la superficie afectada por erosión química de acuerdo con su mecanismo de generación. -----	18
Figura 1.14. Distribución espacial de la pérdida de suelo provocada por erosión química. -----	18
Figura 1.15. Porcentaje de la superficie del país por nivel de afectación provocada por la erosión física. -----	19
Figura 1.16. Porcentaje de la superficie afectada por erosión física de acuerdo con su mecanismo de generación. -----	19
Figura 1.17. Distribución espacial de la pérdida de suelo provocada por erosión física. -----	20
Figura 2.1 Correlograma de una serie de datos considerada como independiente. -----	43
Figura 3.1 Relación funcional entre el potencial erosivo de la lluvia R y la lluvia acumulada en 24 horas. -----	49
Figura 4.1 División municipal del estado de Puebla-----	50
Figura 4.2 Ubicación de las estaciones climatológicas empleadas en este estudio.-----	55
Figura 4.3 Ubicación de las estaciones meteorológicas automatizadas empleadas en este estudio. -----	56
Figura 4.4 Isoyetas de precipitación media anual del estado de Puebla -----	57
Figura 4.5 Curva masa de tormentas acumuladas en 24 horas mayores a 10 mm -----	58
Figura 4.6 Relación funcional entre el potencial erosivo de la lluvia R y la lluvia acumulada en 24 horas para la estación Izucar de Matamoros. -----	59

Figura 4.7 Relación funcional entre el potencial erosivo de la lluvia R y la lluvia acumulada en 24 horas para la estación Tecamachalco (UTT) -----	59
Figura 4.8 Relación funcional entre el potencial erosivo de la lluvia R y la lluvia acumulada en 24 horas para la estación Teziutlán -----	60
Figura 4.9 Relación funcional entre el potencial erosivo de la lluvia R y la lluvia acumulada en 24 horas para la estación Huauchinango -----	60
Figura 4.10 Variación del factor erosivo anual del periodo 1950-2010 en la estación climatológica 21002. -----	61
Figura 4.11 Isolíneas del factor erosivo de lluvia anual-----	62, 67
Figura 4.12 Ubicación de las estaciones cuyas series de factor erosivo anual son consideradas desde el punto de vista estadístico como homogéneas o no homogéneas. -----	63, 67
Figura 4.13 Series empírica y ajustada del factor erosivo anual de la estación 21002 -----	64
Figura 4.14 Isolíneas del factor erosivo anual asociado a 5 años periodo de retorno-----	65
Figura 4.15 Isolíneas del factor erosivo anual asociado a 10 años periodo de retorno -----	66

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1. Tendencias de la deforestación en México (SEMARNAT, 2002b).-----	24, 46, 47
Tabla 1.2. Causas directas estimadas de la deforestación en México (SEMARNAT, 2002b). ---	24
Tabla 3.1. Factor de Cobertura Vegetal C (CONAGUA, 1996) -----	46
Tabla 3.2. Valores generales de SL (CONAGUA, 1996)-----	47
Tabla 4.1 Algunos valores del potencial erosivo de la lluvia R para la EMA “Izúcar de Matamoros” -----	58
Tabla 4.2 Características estadísticas de la serie de factores erosivos anuales para algunas estaciones seleccionadas. -----	61
Tabla 4.3 Parámetros de la distribución Gumbel ajustado a la serie de factores erosivos anuales para algunas estaciones seleccionadas. -----	64
Tabla 4.4 Eventos de diseño de diferente periodo de retorno para la serie de factores erosivos anuales para algunas estaciones seleccionadas. -----	65

Resumen

La erosión es el proceso por el cual el suelo y las rocas son removidos de la superficie de la tierra por procesos exógenos tales como el flujo del agua y el viento, y después transportado y depositado en otras ubicaciones.

La erosión es un proceso natural, sin embargo, las actividades humanas han incrementado varias veces la tasa de erosión global. La erosión causa problemas tales como la desertificación, la disminución de la productividad agrícola debida a la degradación de la tierra, la sedimentación de caminos, y el colapso ecológico debido a la pérdida de las capas superiores de suelo que son ricas en nutrientes.

El objetivo de esta tesis es realizar un análisis de la precipitación y obtener el factor de erosividad de la lluvia " R " que debe utilizarse en la ecuación Universal de pérdida de suelo (USLE). Con este propósito, se utilizó la información de 61 años de lluvia diaria (1950-2010) de 145 estaciones meteorológicas y 4 estaciones meteorológicas automatizadas (EMAS), todas ellas localizadas en el estado de Puebla.

La serie de tiempo anual " R " es estacionaria si la distribución es invariante en el tiempo. Esto significa que estén libres de periodicidades o puntos de cambio. Cuando no se puede asegurar la estacionareidad, el uso del factor de erosividad medio anual en la USLE puede conducir a una subestimación o sobreestimación de la pérdida anual de suelo.

Se emplearon pruebas no-paramétricas para investigar la presencia de puntos de cambio y tendencias en las series anuales de erosividad de la lluvia.

Para cada una de las 67 estaciones con registros no estacionarios se ajustó la distribución de probabilidad Gumbel y se obtuvieron los eventos asociados a 5 y 10 años periodos de retorno.

Abstract

Erosion is the process by which soil and rock are removed from the Earth's surface by exogenetic processes such as water flow and wind, and then transported and deposited in other locations.

While erosion is a natural process, human activities have increased by several times the rate at which erosion is occurring globally. Excessive erosion cause problems such as desertification, decreases in agricultural productivity due to land degradation, sedimentation of waterways, and ecological collapse due to loss of the nutrient rich upper soil layers.

The objective of this thesis is to make a precipitation analysis and obtain the erosivity rainfall " R " that should be used into the Universal Soil Loss Equation (USLE). For this purpose, daily rainfall data for the 61 years (1950-2010) from 145 meteorological stations, and 4 Automatized Weather Stations (EMAS) located in the Mexican state of Puebla were used.

The annual erosivity rainfall time series is stationary if the distribution is invariant under translation in time. This means that they are free of periodicities, abrupt and slowly varying changes. When stationarity cannot be assured, the use of the annual mean erosivity value into the USLE could lead to an underestimation or overestimation of annual soil loss.

Nonparametric tests are used to investigate the presence of change-points and trend in annual erosivity rainfall series.

For each of the 67 stations that present statistically significant change-points and trend (nonstationary series), we describe its distribution in terms of its cumulative distribution function by using the Gumbel distribution, and erosivity rainfall associated to 5- and 10-years return period were estimated.

Introducción

La degradación de los recursos naturales es un problema grave que exige una atención prioritaria para el desarrollo sustentable de una nación. Con el ahondamiento de los problemas ecológicos se ha multiplicado la importancia del aspecto ambiental en los esfuerzos de la planeación económica.

La degradación ambiental es un proceso inducido por el comportamiento de las actividades humanas que daña o altera los recursos naturales y los ecosistemas. Los efectos potenciales son variables y pueden contribuir a incrementar la vulnerabilidad, frecuencia e intensidad de los peligros naturales. La degradación de los suelos; la deforestación; los incendios forestales; la desertificación; la pérdida de la biodiversidad; la contaminación del suelo, aire y agua; el cambio climático; el incremento en el nivel del mar, y la reducción de la capa de ozono, son ejemplos de la degradación ambiental.

La degradación del suelo es todo aquel proceso que produce disminución parcial o total de su capacidad productiva o salud; afectando sus propiedades físicas, químicas y biológicas.

La erosión hídrica es uno de los procesos de degradación más importantes que afectan la capacidad de las tierras en pendiente para la producción de alimentos para el consumo humano o animal, además, la presencia de las plantas y las primeras capas del suelo son imprescindibles para que el agua de las precipitaciones se infiltre, por lo que el aumento en la erosión significa siempre una disminución en la recarga de los acuíferos.

La erosión provoca que aumente la carga sólida que arrastran los ríos disminuyendo sustancialmente la capacidad útil de algunos aprovechamientos hidráulicos. Otro problema añadido del aumento de la carga sólida de los ríos, es que se enturbien las aguas costeras de las zonas donde desembocan. Estas aguas dejan de ser útiles para la pesca, ya que los peces emigran al cambiar las condiciones de su ecosistema y también pierden el atractivo turístico que puedan tener.

La erosión se produce por dos mecanismos. El primero es por el impacto directo de la gota de lluvia sobre la superficie del suelo, que produce la destrucción de los agregados o terrones del suelo cuando está desnudo; mientras que el segundo es cuando el agua escurre sobre la superficie del suelo debido a la pendiente y arrastra partículas del mismo, materia orgánica y nutrientes como el nitrógeno y el fósforo, entre otros.

De acuerdo con la intensidad de lluvia, tipo de suelo y grado de protección de la superficie se producirá erosión hídrica de distinta gravedad. Así se encontrará erosión laminar donde el suelo se pierde en capas muy delgadas. Luego puede aparecer la erosión digital, en forma de los dedos de una mano, donde el agua que escurre desde las lomas más altas a los bajos es capaz de cortar el suelo y formar pequeños surcos de menos de 5 a 10 cm de profundidad. Por último, la forma más grave de erosión lo constituye la formación de surcos y canales profundos, llamados cárcavas. Estas cárcavas pueden tener varios metros de ancho y de profundidad, constituyendo pequeños arroyos.

La situación crítica desde el punto de vista de la erosión lo constituyen los suelos pobres en materia orgánica y con mala estructura, cuando son sometidos a lluvias intensas y cuando están desnudos o con muy escasa protección vegetal. La pendiente del terreno es un factor muy importante en la erosión y con valores mayores al 1% se tienen pérdidas considerables de suelo.

Dada la importancia de la pérdida de suelo, es necesario medir o estimar la erosión potencial para aplicar estrategias que mitiguen sus efectos indeseables.

La identificación de las áreas con riesgos potenciales de erosión y la cuantificación de las pérdidas actuales y potenciales de suelo, constituyen aspectos importantes en la planificación y manejo de las cuencas, sobre todo de las altas, donde la ocurrencia de los procesos erosivos se acelera por la intervención del hombre.

Para la estimación de la erosión se han desarrollado modelos cualitativos y cuantitativos. Dentro de los modelos empíricos destaca la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE), el cual es ampliamente usado para evaluar las pérdidas de suelo por erosión laminar y surcos. Su bondad

depende del rigor con que sus componentes multiplicativas reproduzcan las condiciones del medio físico.

En este trabajo, en el capítulo 1 se describe la importancia de los suelos en los ecosistemas, los mecanismos de degradación y sus medidas de conservación y recuperación.

En el capítulo 2 se hace una breve descripción de las pruebas de homogeneidad e independencia, así como del análisis de frecuencias de eventos extremos que será utilizado para estimar factores erosivos anuales asociados a diferentes periodos de tiempo.

En el capítulo 3 se describe las componentes de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos y el procedimiento para obtener el factor erosivo anual.

En el capítulo 4 se obtienen para todo el estado de Puebla los valores del factor erosivo medio anual y aquellos obtenidos para los periodos de retorno de 5 y 10 años.

Finalmente, en el capítulo 5 se presentan las conclusiones y recomendaciones de este trabajo.

1. El Suelo

Los suelos son fundamentales para el funcionamiento de los ecosistemas terrestres, ya que ofrecen el soporte y el suministro de nutrientes a los cultivos y la cobertura forestal.

Los suelos cumplen además otras funciones igualmente trascendentes, como constituir un medio filtrante que permite la recarga de los acuíferos, influyendo de este modo en la calidad del agua. Asimismo, constituyen el medio donde se realizan los ciclos biogeoquímicos necesarios para el reciclaje de los compuestos orgánicos y tienen la capacidad de filtrar, amortiguar, degradar, inmovilizar y detoxificar materiales orgánicos e inorgánicos.

1.1 Definición

El suelo, además de servir como medio de crecimiento para diversos organismos, mantiene complejas interacciones dinámicas con la atmósfera y los estratos que se encuentran por debajo de él, permitiendo el mantenimiento de los servicios ambientales de los ecosistemas e influyendo en el clima y el ciclo hidrológico.

Así, el suelo es un elemento que, junto con el clima, determina de manera importante la distribución de los ecosistemas y de muchos recursos naturales en una región o territorio.

La definición del suelo depende del área de interés. Desde una visión geotécnica, el suelo es el material sin consolidar que se encuentra sobre el lecho rocoso. La ingeniería civil complementa este concepto señalando que el suelo es un material en el cual se puede excavar, y que dicha propiedad se relaciona directamente con la obra que se va a construir sobre él o con él.

Desde el punto de vista agrícola, el suelo es la capa de material fértil que recubre la superficie de la Tierra y que es explotada por las raíces de las plantas y a partir de la cual obtienen sostén, nutrimentos y agua.

Desde una perspectiva ambiental, este concepto simple ha evolucionado hasta reconocer su papel fundamental en todos los procesos ecosistémicos, debido a las funciones y servicios que realiza,

tal como la regulación y la distribución del flujo de agua o como amortiguador de los efectos de diversos contaminantes.

A partir de su origen y de los factores ambientales, la Sociedad Americana de la Ciencia del Suelo lo define como la capa superficial de material mineral y orgánico no consolidado que sirve de medio natural para el crecimiento de las plantas, y que ha sido sujeto y presenta los efectos de los factores que le dieron origen (clima, topografía, biota, material parental y tiempo) y que debido a la interacción de éstos, difiere en sus propiedades físicas, químicas, biológicas y morfológicas del sustrato rocoso del que se originó. Por ello, el suelo ya no es roca ni sedimento geológico, sino un producto proveniente de las alteraciones e interacciones que experimentan estos materiales.

Aunque el suelo siempre está en formación, el proceso es sumamente lento. Se calcula que para tener un centímetro de suelo en la capa superficial son necesarios entre 100 y 400 años, por lo cual se considera que el suelo es un recurso natural no renovable en la escala de tiempo humana.

De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), en México existen 26 de los 30 grupos de suelo reconocidos por el Sistema Internacional Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. El 52.4% del país está cubierto por sólo tres grupos: Leptosoles, Regosoles y Calcisoles, que son suelos someros y poco desarrollados, difíciles para su aprovechamiento agrícola y vulnerables a las actividades productivas. En contraste, los suelos con mayor fertilidad, los Phaeozems, Luvisoles y Vertisoles, utilizados intensamente en la producción agrícola o como zonas de agostadero cubren, en conjunto, el 29.4% del país. Los 20 grupos restantes ocupan el 18.3% del territorio nacional. En la Figura 1.1 se presenta la distribución espacial de los suelos en México, y su proporción relativa se muestra en la Figura 1.2.

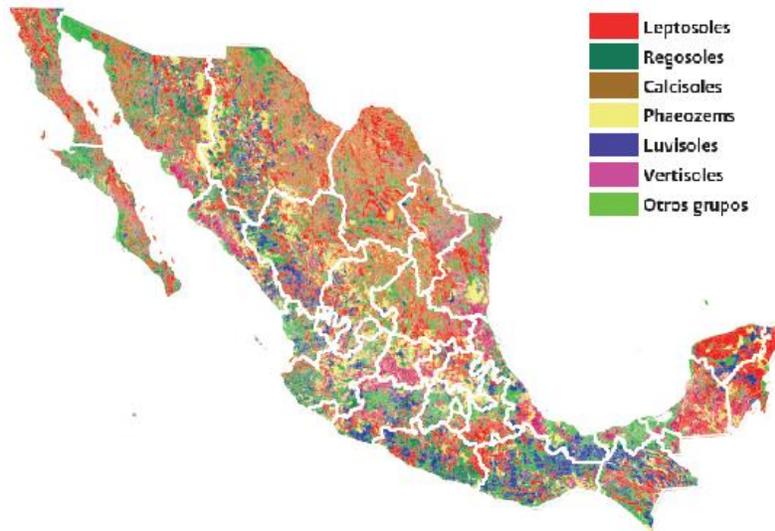


Figura 1.1. Distribución espacial de los tipos de suelo en México (SEMARNAT,2008)

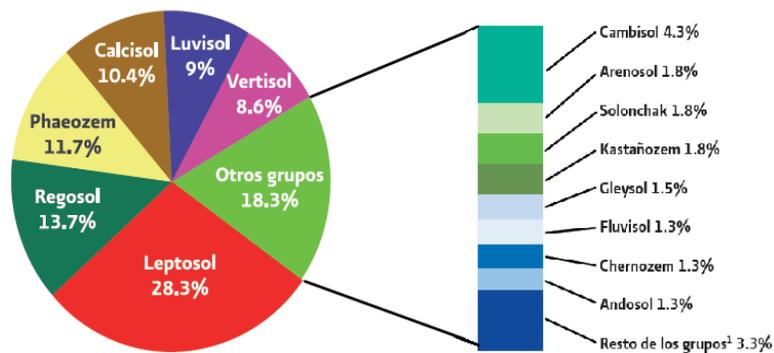


Figura 1.2. Composición relativa de los suelos en México (SEMARNAT, 2008)

La intensidad en el desarrollo agropecuario del país en las últimas décadas determinó que los suelos más fértiles y profundos, con buena estructura y alto contenido de nutrientes y materia orgánica tuvieran mayor demanda.

Tan sólo entre 1976 y 2002 la proporción de Luvisoles, Vertisoles y Phaeozems dedicados a actividades agrícolas y pecuarias pasó de 31.8% (24.1% en agricultura y 7.7% en pastizales) a

38.9% (28.4% en agricultura y 10.5% en pastizales). También, pero en menor magnitud, los suelos que se consideran menos aptos para la agricultura o ganadería están siendo utilizados para estos fines. En 1976, 7.4% de la superficie nacional cubierta por este grupo de suelos (Leptosoles, Regosoles y Calcisoles) era utilizada en estas actividades y en 2002 ya se utilizaba 10.6% (7.2% en agricultura y 3.4% en pastizales). Esta variación temporal se puede observar en la Figura 1.3.

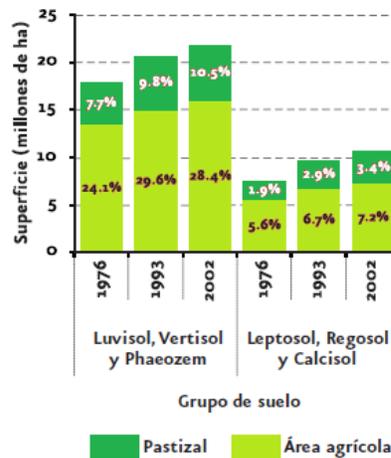


Figura 1.3. Superficie relativa cubierta por los principales grupos de suelo en México (SEMARNAT, 2008)

1.2 Degradación de los suelos en México

Las sociedades humanas modernas, erróneamente han concebido a los suelos como simples soportes mecánicos de las plantas o como sitios de establecimiento de los asentamientos humanos, ignorando su importancia biológica, ecológica, fisicoquímica, socioeconómica y cultural. Esta concepción ha contribuido, junto con otros factores, a los procesos de destrucción y degradación que afectan a los suelos.

La degradación del suelo se refiere básicamente a los procesos relacionados con las actividades humanas que reducen su capacidad actual y futura para sostener ecosistemas naturales o manejados y producir sus servicios ambientales intrínsecos, debido a la disminución de su productividad biológica o de su biodiversidad, reduciendo, así, su capacidad actual para sostener la vida humana.

La degradación del suelo ocurre como resultado de múltiples factores ambientales y socioeconómicos entre los que se encuentran la topografía, el clima, los sistemas de producción y de tenencia de la tierra, las políticas públicas y el mercado. Rara vez es un sólo factor el que desencadena la degradación del suelo y la pérdida de la cubierta vegetal, aunque en prácticamente todos los casos el factor dominante son las actividades humanas a través del cambio de uso del suelo, que sustituye la vegetación natural por terrenos para las actividades agrícolas y ganaderas.

Actualmente, la degradación de suelos se presenta en muchos países, entre ellos México, y muy especialmente en aquellos que mantienen esquemas de crecimiento basados en el uso irracional de los recursos naturales. La degradación del suelo tiene efectos ambientales y socioeconómicos negativos, debido a su relación con la reducción de la biodiversidad, la pobreza, la migración y la seguridad alimentaria.

Se han realizado diversos estudios para estimar la superficie nacional con degradación de suelo, sin embargo sus resultados no son comparables debido a diferencias metodológicas y a la escala utilizada.

Se reconocen dos categorías de procesos de degradación de suelos causada por el hombre. La primera categoría se trata de la degradación por desplazamiento del material del suelo. En esta categoría se puede distinguir efectos en el sitio, que afectan áreas cercanas a éste (efectos “en granja”), incluyen los depósitos locales, y los efectos fuera del sitio, que son efectos a una considerable distancia de éste (por lo menos a un kilómetro de distancia).

La segunda categoría describe los tipos de degradación del suelo como resultado de su deterioro interno. En esta categoría sólo se reconocen los efectos *in situ* en suelos que han sido abandonados o forzados a usos menos intensivos. No se refiere a las fluctuaciones cíclicas de los procesos químicos, físicos del suelo y/o a las condiciones biológicas relativamente estables de sistemas agrícolas, en las que se maneja activamente la tierra para mantener su productividad, tampoco se refiere al cambio gradual en la composición química como resultado de los procesos de formación del suelo.

1.2.1 Degradación por desplazamiento de material

Erosión hídrica

a) Dentro del sitio:

1. Pérdida de la capa superficial del suelo. Se presenta una pérdida uniforme por deslave de la superficie y erosión laminar.
2. Deformación del terreno. Un desplazamiento irregular de los materiales del suelo, se caracteriza por la presencia de arroyos mayores, barrancas o movimiento en masa, en cárcavas principalmente.

b) Fuera del sitio:

1. Depósitos, acumulaciones y sedimentos en los lagos.
2. Inundaciones. Incluye rellenos de materiales no deseables en las márgenes de los ríos, erosión de los depósitos aluviales, acumulación excesiva de sedimentos en las cuencas.
3. Destrucción de arrecifes de coral, sedimentos de conchas y algas marinas.

Erosión eólica

a) Dentro del sitio:

1. Pérdida de la capa superficial del suelo. Es el desplazamiento uniforme por deflación.
2. Deformación del terreno. Se presentan desplazamientos desiguales, caracterizados por la formación de grandes hondonadas, montículos o dunas.

b) Fuera del sitio:

1. Tolvaneras. Daño a estructuras como caminos, edificios y/o destrucción de la vegetación por la arena.

1.2.2 Degradación por deterioro interno

Degradación química

1. Disminución de la fertilidad del suelo. Se origina por la disminución de los elementos minerales y de la materia orgánica disponible en el suelo.
2. Polución. Se debe a la presencia, la concentración y el efecto biológico adverso de algunas sustancias. Éstas pueden provenir de tiraderos a cielo abierto, derrames, residuos industriales, deposición de compuestos acidificantes y/o metales pesados.
3. Salinización. Causada por actividades humanas tal como la irrigación.

4. Eutrofización. Es el exceso de nutrientes en el agua que perjudica el desarrollo de la vida acuática.

Degradación física

1. Encostramiento de la capa superficial del suelo. Costras a simple vista sobre los terrenos.
2. Compactación. Causada por maquinaria pesada en suelos con débil estabilidad estructural, o en suelos donde el contenido de humus es bajo.
3. Anegamiento. Se debe a la presencia de una lámina superficial de agua sobre el suelo, frecuentemente asociada a la construcción de represas para riego.
4. Disminución de la disponibilidad de agua. Se origina por la extracción excesiva, con fines agrícolas o de suministro a la población o por la disminución de la cobertura vegetal y de la materia orgánica del suelo.
5. Pérdida de la función productiva.

Degradación biológica

1. Desbalance de la actividad (micro) biológica de la capa superficial del suelo. Este puede ser causado por la deforestación del trópico húmedo o por la sobreaplicación de fertilizante químico en áreas industrializadas, en México muy especialmente por quemas agropecuarias e incendios forestales.

1.2.3 Evaluación del proceso de degradación

En el trabajo *Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre* elaborada por la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y el Colegio de Posgraduados (2002), se muestra el estudio más reciente sobre de degradación de suelos en México, y el que se ha realizado con mayor nivel de resolución. En él se consideraron cuatro procesos de degradación: la erosión hídrica y eólica y la degradación física y química. A su vez, cada proceso fue evaluado en diferentes direcciones: causas, tipos específicos y niveles de afectación. Para ello, el país fue dividido en unidades cartográficas de diferente tamaño y se consideró como degradación o erosión dominante a aquella que cubría más de 30% de la superficie de cada unidad.

Según este estudio, el 44.9% de la superficie nacional mostraba algún signo de degradación, siendo la degradación química y la erosión hídrica los procesos más importantes (Figura 1.4).

Con respecto al nivel de degradación, el ligero y moderado alcanzaron el 42.8% de la superficie del país y el 2.1% restante se dividió entre los niveles fuerte y extremo (Figura 1.5). Las principales causas asociadas con la degradación fueron las actividades agrícolas y pecuarias y la deforestación.

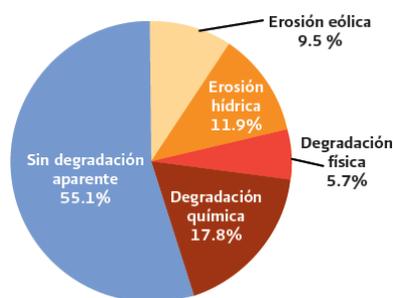


Figura 1.4. Porcentaje del territorio nacional afectado por tipo de proceso de degradación (SEMARNAT, 2008)

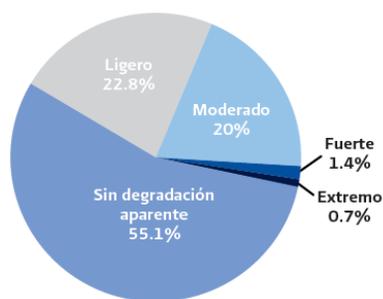


Figura 1.5. Porcentaje del nivel de degradación de los suelos en México (SEMARNAT, 2008)

La superficie nacional afectada por erosión hídrica y eólica es de 22.73 y 18.12 millones de hectáreas, respectivamente. En las Figuras 1.6, 1.7 y 1.8 se muestran los efectos de la erosión

hídrica sobre el territorio nacional, en tanto que en las Figuras 1.9, 1.10 y 1.11 se dan para el caso de la erosión eólica.

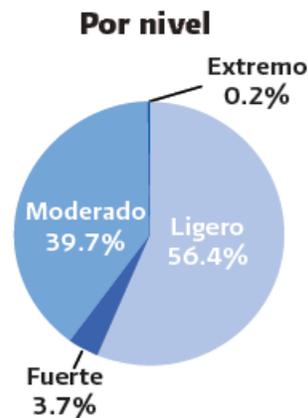


Figura 1.6. Porcentaje de la superficie del país por nivel de afectación provocada por la erosión hídrica (SEMARNAT, 2008)



Figura 1.7. Porcentaje de la superficie afectada por erosión hídrica de acuerdo con su mecanismo de generación (SEMARNAT, 2008)

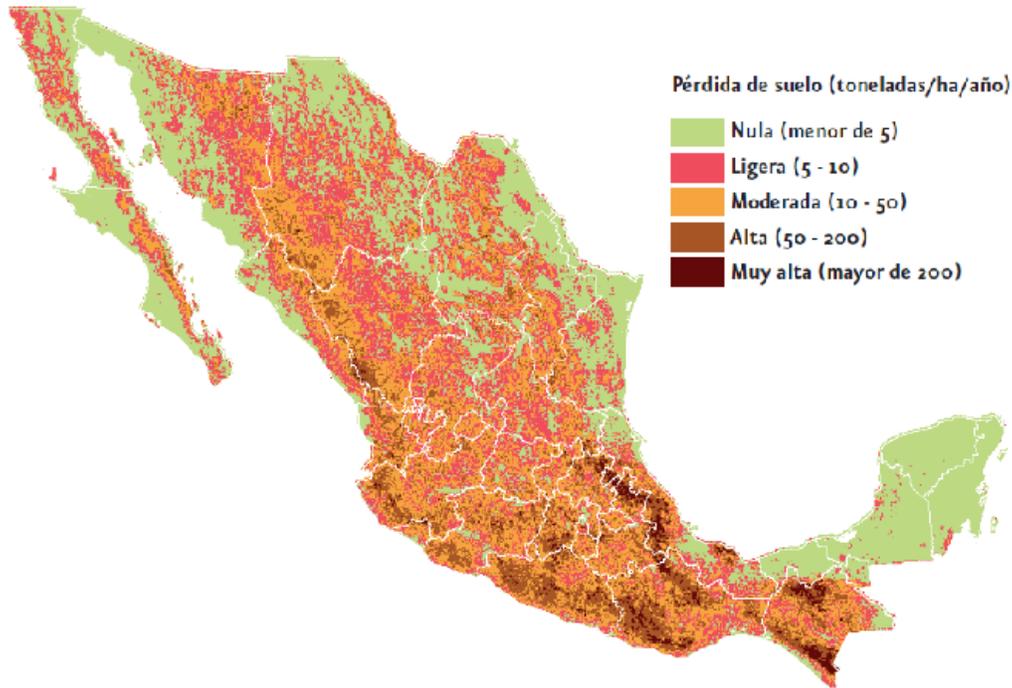


Figura 1.8. Distribución espacial de la pérdida de suelo provocada por erosión hídrica (SEMARNAT, 2008)

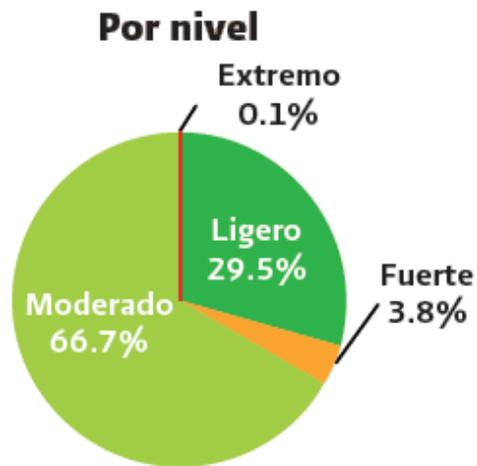


Figura 1.9. Porcentaje de la superficie del país por nivel de afectación provocada por la erosión eólica (SEMARNAT, 2008)

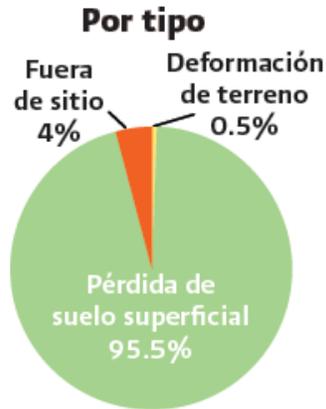


Figura 1.10. Porcentaje de la superficie afectada por erosión eólica de acuerdo con su mecanismo de generación (SEMARNAT, 2008)

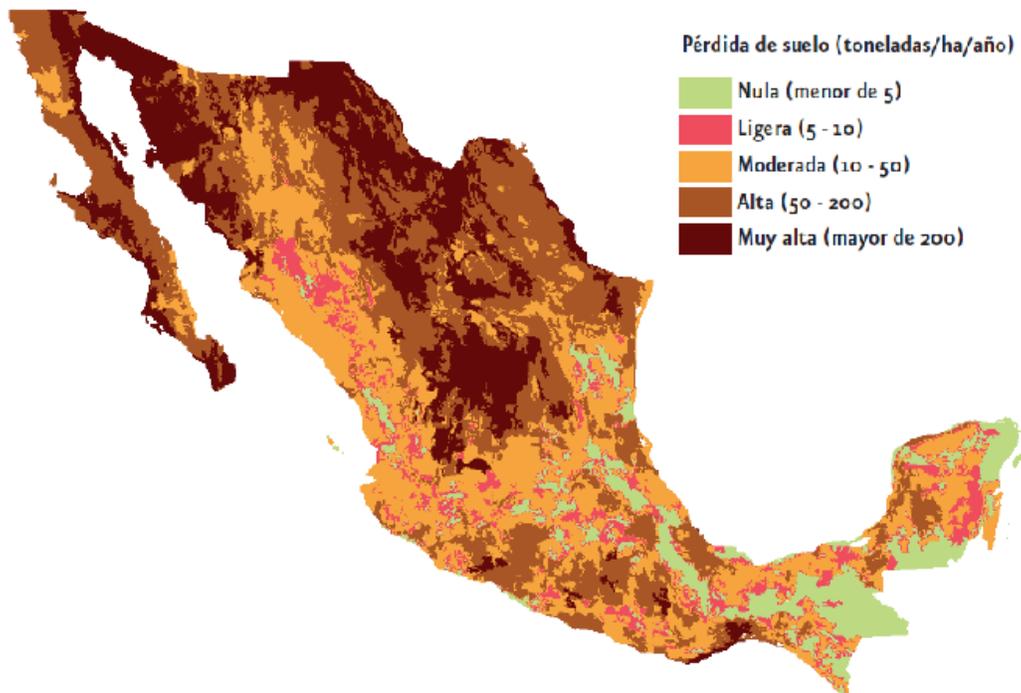


Figura 1.11. Distribución espacial de la pérdida de suelo provocada por erosión eólica (SEMARNAT, 2008)

La degradación química y física ocasiona el deterioro interno del suelo. La primera conduce a la disminución o eliminación de su productividad biológica, mientras que la degradación física modifica su estructura, lo que se manifiesta, por ejemplo, en la pérdida o disminución de su capacidad para absorber o almacenar agua.

En el 2002, el 23.5% de superficie nacional mostraba evidencias de estos tipos de degradación: 17.8% correspondía a la química (siendo el proceso de degradación más importante en el país) y 5.7% a la física.

En el caso de la degradación química, el tipo dominante es la disminución de la fertilidad del suelo, mientras que en la física, es la compactación. En ambos procesos, el nivel de degradación dominante es el ligero.

La superficie nacional afectada por erosión química y física es de 34.00 y 10.84 millones de hectáreas, respectivamente. En las Figuras 1.12, 1.13 y 1.14 se muestran los efectos de la erosión química sobre el territorio nacional, en tanto que en las Figuras 1.15, 1.16 y 1.17 se dan para el caso de la erosión física.

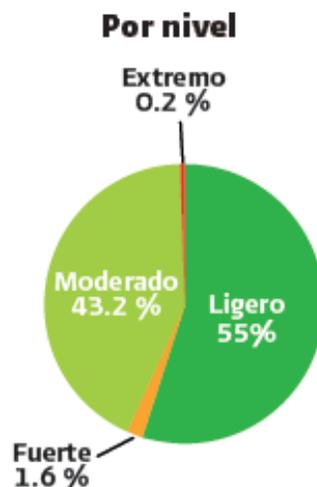


Figura 1.12. Porcentaje de la superficie del país por nivel de afectación provocada por la erosión química (SEMARNAT, 2008)

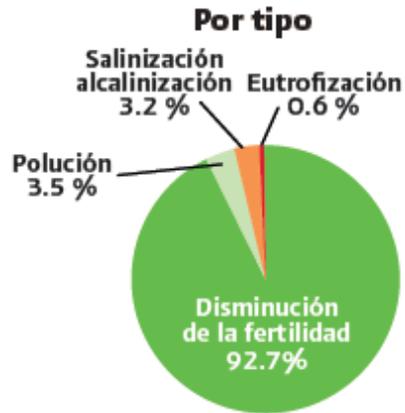


Figura 1.13. Porcentaje de la superficie afectada por erosión química de acuerdo con su mecanismo de generación (SEMARNAT, 2008)

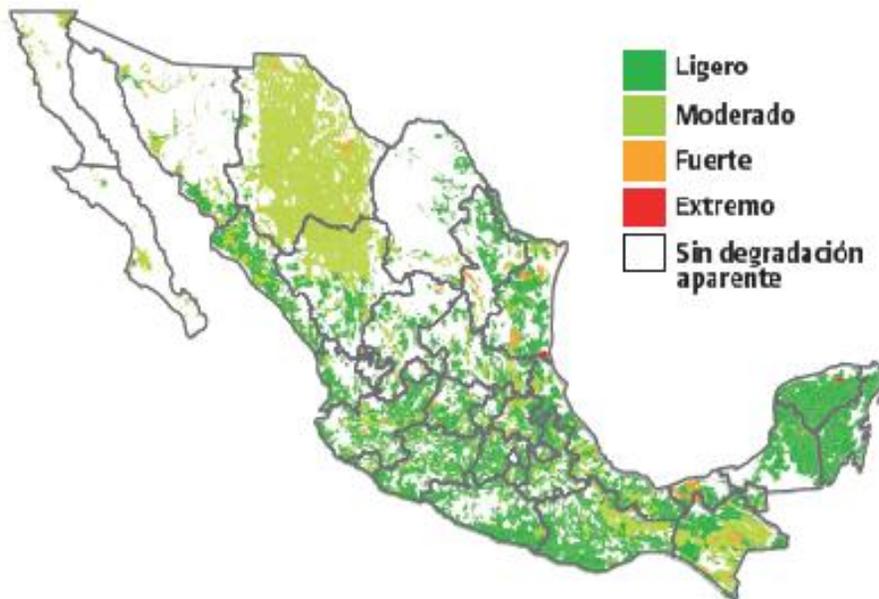


Figura 1.14. Distribución espacial de la pérdida de suelo provocada por erosión química (SEMARNAT, 2008)

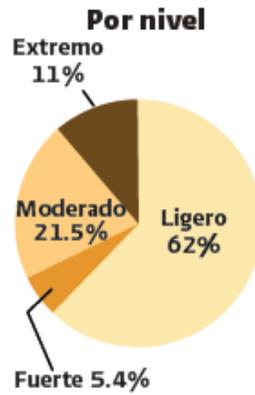


Figura 1.15. Porcentaje de la superficie del país por nivel de afectación provocada por la erosión física (SEMARNAT, 2008)

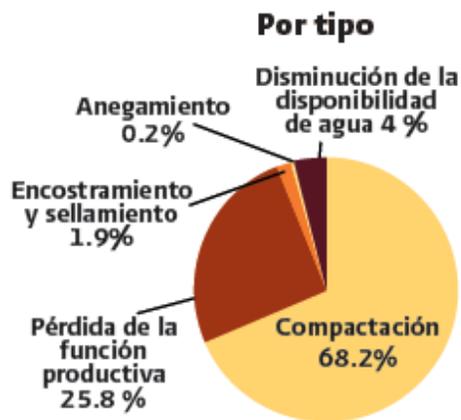


Figura 1.16. Porcentaje de la superficie afectada por erosión física de acuerdo con su mecanismo de generación (SEMARNAT, 2008)

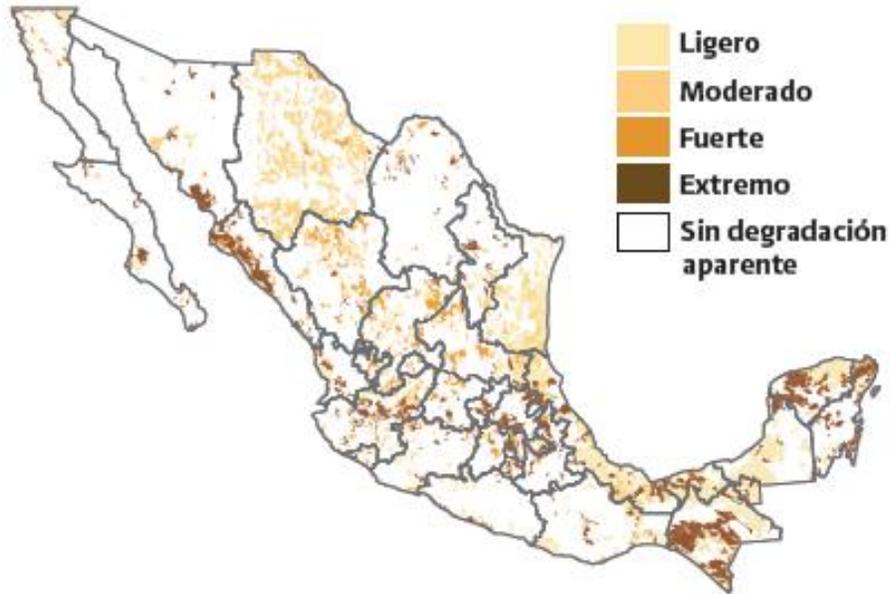


Figura 1.17. Distribución espacial de la pérdida de suelo provocada por erosión física (SEMARNAT, 2008)

1.3 Desertificación en México

La desertificación es un término que se aplica a la degradación de la tierra en zonas áridas, semiáridas y subhúmedas, debida a variaciones climáticas y a las actividades humanas. El término fue acuñado en 1949 por un silvicultor francés que trabajaba en África occidental y lo utilizaba para describir la destrucción gradual de los bosques de las zonas húmedas adyacentes al desierto del Sahara, hasta que éstos desaparecían y el área se hacía más desértica.

En México, el concepto de desertificación se ha ampliado hacia todos los ecosistemas, debido a que la degradación de la tierra no está restringida a las zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas. Sin embargo, se considera que éstas son las más vulnerables a la desertificación.

Los cambios en la cobertura vegetal y la evidencia de la erosión de los suelos son más visibles en las áreas de ladera que en las áreas planas, debido a que la velocidad del escurrimiento es mayor, el cual deja expuestas capas de subsuelo más rápidamente que en las áreas planas.

La vulnerabilidad de un suelo a la desertificación depende de factores como el clima, la topografía, condiciones de los suelos (textura, estructura e índice de fertilidad) y de la cobertura vegetal, ya sea natural o inducida. Entre los factores antropogénicos se incluyen entre otros, el cultivo en suelos frágiles, la reducción del tiempo de descanso de la tierra, el sobre pastoreo, y el mal manejo del agua de riego y de la maquinaria agrícola.

Los factores que han favorecido el proceso de desertificación en México son debido a la tala de selva y bosque, la degradación de la tierra debido a la erosión y la presión social que demanda cada vez más mayores tierras de cultivo.

El llamado sobrepastoreo es el resultado de mantener demasiado ganado en una superficie dedicada a pastos, y tiene como resultado la pérdida de especies comestibles y el consiguiente crecimiento de especies no comestibles. Si la excesiva presión de pastoreo continúa, la pérdida de la cubierta vegetal puede llevar a la erosión del suelo.

Las estimaciones sobre la magnitud de la desertificación son muy diferentes porque dependen del método de cálculo y del tipo de degradación del suelo incluido en la evaluación.

La Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (CNULD, UNCCD según las siglas en inglés) calcula que entre 71 y 75% de las zonas secas del mundo están desertificadas, aunque esta cifra ha sido criticada debido a que las estimaciones se han hecho tomando en cuenta separadamente los factores biofísicos (erosión o pérdida de la cobertura vegetal) y socioeconómicos (pérdidas económicas, disminución de la producción, migraciones humanas) de la desertificación; basta señalar que raramente se consideran ambos grupos de factores simultáneamente para estimar la magnitud de la desertificación.

En México, a la fecha, no existen estudios específicos sobre la extensión de la desertificación a nivel nacional, sin embargo, para tener una idea de la magnitud de este fenómeno, se consideró a la degradación del suelo como un estimador de la desertificación en las zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas del país, sin perder de vista que es sólo uno de sus elementos.

Tomando el criterio antes señalado, en nuestro país la degradación del suelo afecta a 44.2% de las tierras secas en distintos niveles de intensidad.

Entre 93 y 97% del total de la superficie con degradación en las zonas secas ya se encuentra en los niveles de ligera y moderada, lo que es un foco de alerta, debido a que de continuar este proceso se puede llegar a los niveles de degradación fuerte o extrema, en los cuales la recuperación de la productividad del suelo es materialmente imposible.

Las zonas secas que no presentan evidencias de degradación de suelo se encuentran en el centro del Desierto Chihuahuense (cerca de la confluencia de los estados de Chihuahua, Coahuila y Durango), el Gran Desierto de Altar, al Noroeste de Sonora y la península de Baja California.

1.4 Deforestación en México

Se entiende por deforestación a la destrucción a gran escala de áreas arboladas y su reemplazo por usos no forestales. La deforestación es la principal causa de la crisis ambiental en el mundo, ya que se pierden cerca de 17 millones de hectáreas de selvas y bosques al año. Entre 1980 y 1990, las tasas anuales de deforestación fueron de un 1.2% en Asia y el Pacífico, un 0.8% en Latinoamérica y un 0.7% en África.

La deforestación es un proceso que afecta de manera negativa la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas, produciendo modificaciones en el ciclo hidrológico (variaciones en la temperatura y precipitación), las cuales favorecen el calentamiento global.

La deforestación no es lo mismo que la degradación forestal, la cual consiste en una reducción gradual de la biodiversidad (ecosistemas, especies y tipos genéticos). Ambos procesos están vinculados y producen problemas de erosión del suelo y desestabilización de las capas freáticas, lo que a su vez favorecen las inundaciones y sequías.

La deforestación y la degradación forestal pueden generar la extinción local o regional de las especies, la pérdida de recursos genéticos, el aumento en la ocurrencia de plagas, la disminución

en la polinización de cultivos comerciales, la alteración de los procesos de formación y mantenimiento de los suelos (erosión), la reducción de la recarga de acuíferos y el incremento en la vulnerabilidad ante un desastre natural.

Los procesos de deforestación son más destructivos en los trópicos, ya que la mayor parte de los suelos forestales tropicales son menos fértiles que los de las regiones templadas y resultan fácilmente erosionables al proceso de lixiviación, causado por el elevado nivel de lluvia, el cual impide la acumulación de nutrientes en el suelo.

El disturbio forestal es una alteración a la vegetación, la cual puede producirse directa o indirectamente por el hombre o por la ocurrencia de plagas e incendios forestales.

Se define como perturbación forestal al cambio en la constitución de la vegetación natural producido por agentes destructores y engloba deforestación, degradación y disturbio forestal.

Los bosques desempeñan un papel clave en el almacenamiento del carbono; si se eliminan, el exceso de bióxido de carbono en la atmósfera puede llevar a un calentamiento global y el efecto invernadero en el planeta.

México posee unos 56 millones de hectáreas arboladas de bosques y selvas, una cuarta parte del territorio nacional. De este, la mitad es una mezcla de selvas tropicales de diferentes características y la mitad es bosque templado. Sólo 20 millones de hectáreas corresponden a bosques y selvas densas y compactas.

En México, la tasa de deforestación varía de entre 370,000 y 746,000 ha/año, según las diferentes definiciones, enfoques, metodologías y escalas geográficas empleadas para su estimación.

En las Tablas 1.1 y 1.2 se presentan las tendencias de la deforestación en la República Mexicana y las causas directas estimadas que la provocan.

Tabla 1.1. Tendencias de la deforestación en México (SEMARNAT, 2008)

Periodo	Superficie Arbolada (Millones ha)	Deforestación Total (Millones ha)	Deforestación Anual (Millones ha)
Original a 1950	98.0-77.8	20.2	
1950-1970	77.8-67.8	10.0	0.5
1970-1980	67.8-60.8	7.0	0.7
1980-1990	60.8-56.8	4.0	0.4
1990-1995	56.8-55.3	1.5	0.3
	Total	42.7	

Tabla 1.2. Causas directas estimadas de la deforestación en México (SEMARNAT, 2008)

Causa	%
Desmonte para uso agropecuario	82
Cambio de uso del suelo autorizado	2
Incendios forestales	4
Tala ilegal	8
Plagas y enfermedades	3
Otros factores	1

De acuerdo con cifras de SEMARNAT, para el periodo de 1973 a 1993, los estados de Veracruz, Tabasco y Distrito Federal habían perdido entre 1 y 2% anual de la vegetación natural remanente que tenían en 1973 en el periodo de análisis. Le siguen con tasas entre 0.6% y 0.9% los estados de Tamaulipas, Chiapas y Aguascalientes; los que presentan una tasa entre 0.2 y 0.5% son Oaxaca, Guerrero, Campeche, Zacatecas, Estado de México, Nuevo León, Sinaloa e Hidalgo. El resto de los estados de la República presentaron una tasa menor a 0.1%.

La deforestación es un factor que incide de manera importante en la calidad del suelo, ya que una vez que éste ha sido deforestado es incapaz de oponer resistencia a la acción del viento y el agua, provocándose la pérdida de la cubierta fértil por el arrastre de las corrientes. Estos procesos se acentúan en las regiones de selvas subhúmedas y húmedas y en general en las zonas montañosas del país, cuyos suelos se caracterizan por su pobreza y alta vulnerabilidad, lo que provoca que una vez deforestados, se agotan en 2 o 3 ciclos de cultivo.

La magnitud del problema edáfico se agrava en nuestro país tanto por la escasez de conocimientos especializados de este recurso (particularmente los que se refieren a sus aptitudes y vulnerabilidad) como por las fallas en la regulación de su uso y manejo.

1.5 Conservación y recuperación de los suelos

Históricamente, el suelo ha sido un recurso natural poco atendido por los gobiernos y la sociedad en general, a pesar de que su degradación tiene consecuencias negativas tanto ambientales como sobre el bienestar de la población.

La pérdida de la productividad de los ecosistemas, presencia de tolvaneras, pérdida de hábitats acuáticos y disminución del rendimiento pesquero, aumento de la frecuencia de inundaciones, incremento de la emisión de gases de efecto invernadero al oxidarse la materia orgánica, son sólo algunas de las consecuencias ambientales asociadas a la degradación de los suelos. Todas ellas están muy relacionadas con el incremento de la pobreza.

Para hacer frente al problema de la degradación del suelo, la mejor alternativa es utilizar un enfoque de manejo sustentable, el cual además de atender las necesidades humanas actuales, considera preservar un ambiente sano para las generaciones futuras.

Es una forma de conservación de los recursos, que hace referencia al manejo de los mismos de manera que se asegure la continuidad de los procesos naturales y la preservación de beneficios a las sociedades humanas. El manejo sustentable incluye distintos grados de uso y niveles de protección.

Un adecuado manejo sustentable de los recursos naturales nos lleva a un desarrollo sustentable (sostenible) que puede ser definido como "un desarrollo que satisfaga las necesidades del presente sin poner en peligro la capacidad de las generaciones futuras para atender sus propias necesidades" (esta definición fue empleada por primera vez en 1987 en la Comisión Mundial del Medio Ambiente de la ONU, creada en 1983).

El objetivo del desarrollo sustentable es alcanzar la Equidad Social, debido a la contribución de oportunidades de trabajo a la población, satisfaciendo las necesidades básicas de las personas, con la finalidad de erradicar la pobreza, ya que promueve la creación y crecimiento de la economía y la industria.

Cabe señalar que el manejo sustentable de los recursos naturales debe ir en pro de la conservación ambiental, donde el usar deja de ser sinónimo de dañar. Sin embargo, para llegar a este equilibrio, se necesita del conocimiento y desarrollo de la ciencia y tecnología. Este conocimiento permite comprender cómo funcionan nuestros recursos y, de acuerdo a ello, encontrar alternativas y herramientas para manejarlos sin dañarlos.

Sin embargo, llevar este principio a la práctica no es una tarea sencilla, ya que, además del componente estrictamente ambiental, existe una serie de factores sociales, económicos y políticos que dificultan la eliminación o el amortiguamiento de las causas que provocan la degradación del suelo.

Por ello, son necesarias acciones que promuevan el manejo sustentable del suelo mediante el impulso al sector rural, el acceso a tecnología adecuada y asequible y la asistencia a la comercialización, todas ellas considerando las condiciones y necesidades de cada región del país y sin que esto comprometa la actividad agrícola y comercial de la población actual.

A pesar de que se carece de una estrategia nacional integral para la conservación de suelos en la cual se definan acciones directas y específicas para la conservación y el mantenimiento de sus funciones, dentro de los programas operados por la SEMARNAT, SAGARPA, la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) y la Comisión Nacional de Zonas Áridas (CONAZA) se aplican acciones indirectas con apoyo económico y técnico enfocadas a la realización de obras hidráulicas, de reforestación y de manejo de tierras agrícolas que están dirigidas a conservar este importante recurso natural.

Sin embargo, es complicado determinar con precisión la superficie en la cual se realizan prácticas de conservación y recuperación, debido a esto es insuficiente la información confiable que permite evaluar el desempeño de estos programas.

Dada la magnitud del problema y la insuficiencia de recursos destinados a este fin, el reto es focalizar los apoyos en función de las características de la degradación de los suelos con acciones específicas para cada tipo y nivel de degradación observado. Las acciones de conservación más comunes que se aplican están dirigidas al control de los escurrimientos que afectan la infraestructura y los centros de población, pero son poco eficaces para revertir, por ejemplo, el problema de la degradación química, en la modalidad de pérdida de la fertilidad, que es el tipo de degradación dominante en el país, causado principalmente por prácticas agrícolas y pastoriles deficientes.

La recuperación y conservación de los suelos es un proceso complejo que involucra aspectos ecológicos, sociales y económicos.

De esta manera, la susceptibilidad y resiliencia de los suelos y el tipo e intensidad de la degradación determinarán las acciones necesarias, así como el tiempo y los recursos económicos que se requieren invertir en esas tierras. En general, existen pocos estudios que enfatizan la importancia de estos últimos aspectos, los cuales son indispensables en la planeación de estrategias y programas de recuperación y conservación de suelos.

La dificultad en la recuperación de los suelos no recae tanto en las técnicas sino en la organización, convencimiento y apropiación de parte de los usuarios de la tierra, por un lado, así como de los gobiernos locales y federal, por el otro.

1.6 Prácticas y obras para el aprovechamiento sustentable del suelo

Las Reglas de Operación del programa de Uso Sustentable de Recursos Naturales para la Producción Primaria consideran como uno de sus componentes al programa de Conservación y Uso Sustentable de Suelo y Agua (COUSSA).

El objetivo de COUSSA es el revertir el deterioro de los ecosistemas, a través de acciones para preservar el agua, el suelo y la biodiversidad, contribuyendo a la conservación, uso y manejo sustentable de los recursos Suelo, Agua y Vegetación utilizados en la producción primaria, mediante el apoyo subsidiario a la población rural para que invierta, a través de proyectos integrales, en la construcción, establecimiento y desarrollo de obras y prácticas orientadas a la conservación y recuperación de tierras, la captación, conducción, almacenamiento e infiltración de agua de lluvia y a la regeneración, mejoramiento y aprovechamiento racional de la cubierta vegetal.

Por su carácter subsidiario, es importante destacar que los apoyos del programa buscan posibilitar el acceso a los productores a realizar obras y prácticas que por su costo y especificidad técnica, por su propia cuenta les sería difícil realizar. No atiende por tanto, la realización de prácticas que pueden adoptarse por el productor con asesoría técnica o bien que forman parte de las labores culturales o de manejo en su parcela.

En el entendido de que sería materialmente imposible y muy poco eficiente tratar de atender el total de la superficie clasificada como de sequía recurrente, la afectada con procesos de erosión o de tierras frágiles con un solo programa o componente como lo es el de COUSSA, los recursos en co-ejercicio para esta componente se orientan en primera instancia a atender prioridades regionales definidas de manera conjunta en cada entidad federativa entre la Delegación de la SAGARPA y los Gobiernos Estatales.

La presencia y el apoyo de técnicos especializados en la planeación y realización de obras y prácticas de conservación y uso sustentable del suelo y el agua es indispensable, ya que se requieren estudios topográficos e hidrológicos para determinar, entre otros aspectos, el área de la cuenca, la precipitación promedio, el coeficiente de escurrimiento, la precipitación máxima esperada para un periodo de retorno dado (5 ó 10 años), el volumen a almacenar, etc.

Las obras, prácticas y acciones para el manejo sustentable de los suelos sujetas de apoyo por este programa pretenden realizar proyectos integrales, a través de prácticas vegetativas y de construcción.

1.6.1 Prácticas vegetativas

Reforestación con Especies Nativas Arbustivas y Forestales

Definición: Regeneración de áreas altamente o totalmente deforestadas, con la plantación de especies nativas.

Finalidad y Beneficios: Garantizar el éxito de una reforestación y disminuir los riesgos de erosión del suelo ya que las plantas nativas tienen mayor adaptabilidad y rápida colonización que una especie introducida.

Plantación de Especies Nativas Perennes en bordos de Tinas Ciegas, Zanjas - Bordo y Zanjas de infiltración Trinchera

Definición: Práctica de interceptación y concentración de los escurrimientos superficiales que mejoran las posibilidades de adaptación de la plantación, de especies nativas perennes, en los terrenos.

Finalidad y Beneficios: Garantizar la disponibilidad de agua, mejorar las posibilidades de establecimiento de una plantación, mejorar la densidad de población, favorecer la infiltración de agua al manto freático y, protección de bordos.

Empastado de Taludes de Cárcavas

Definición: Método de estabilización de taludes en cárcavas que se basa en el establecimiento de pastos que protegen por su densidad del sistema radicular y de la capacidad de cobertura vegetal del terreno.

Finalidad y Beneficios: Proteger los taludes naturales contra la erosión hídrica, ya que disminuye la velocidad de escurrimientos por aumento de rugosidad, da firmeza y estabilidad al suelo que constituye el talud.

Empastado de Taludes de Obra Nueva

Definición: Método de recubrimiento, que aprovecha el sistema radicular de los pastos, para brindar estabilidad a los taludes de obras de captación de agua y de conservación de suelos recién construidas como son: jagüeyes, terrazas, presas de tierra, bordos, zanjas-bordo, entre otras.

Finalidad y Beneficios: Proteger los terraplenes y taludes naturales contra la erosión hídrica, ya que disminuye la velocidad de escurrimientos por un aumento en la rugosidad y da estabilidad al suelo que constituye el talud.

Repastización de Agostaderos

Definición: Se refiere al establecimiento de especies forrajeras perennes, en terrenos no aptos para la realización de cultivos anuales de labranza o en áreas desprovistas de vegetación por la producción ganadera.

Finalidad y Beneficios: Proporcionar una protección completa al suelo contra la erosión hídrica o eólica, reducir la velocidad del agua que corre sobre la superficie del terreno, y producir forraje para la alimentación del ganado.

Plantación de Barreras Vivas con especie perennes

Definición: Son arreglos lineales para el establecimiento de especies vegetales utilizados, en área destinada a la producción agropecuaria, como barreras al libre paso de animales y sedimentos.

Finalidad y Beneficios: Reducir la longitud de la pendiente, minimizar la velocidad del viento que causa la erosión eólica, retardar el escurrimiento para aumentar la infiltración, conservar la humedad y prevenir la formación de cárcavas.

Plantación de Barreras Vivas con Maguey

Definición: Utilización de especies agaváceas para control de erosión en suelos de difícil enraizamiento.

Finalidad y Beneficios: Por su alta capacidad de enraizamiento y adaptabilidad a condiciones de escasa precipitación, se utiliza para reducir la erosión hídrica, para estabilizar terraplenes de bordos o terrazas, y para apoyar la economía familiar con forraje y otros subproductos.

Plantación de Barreras Vivas con Nopal

Definición: Cercas de hileras con especies cactáceas perennes principalmente del género (*Opuntia*), plantadas a lo largo de bordos-zanja siguiendo las curvas de nivel, terrazas individuales o en fajas entre parcelas.

Finalidad y Beneficios: El sistema radical de estas plantas es robusto y con buen anclaje, lo cual contribuye a estabilizar el suelo. Se utilizan como cerco para evitar el libre tránsito de los animales a las parcelas y es una alternativa de bajo costo para la conservación de suelos.

Formación de Cortinas Rompe Vientos

Definición: Son barreras que se establecen con árboles y/o arbustos de diferentes alturas, orientadas de forma paralela a los límites del terreno y perpendicularmente a la dirección dominante de los vientos.

Finalidad y Beneficios: Atenuar o nulificar la intensidad del viento, mitigar la erosión eólica, proteger los cultivos anuales del acame, conservar la humedad y mejorar la estética del paisaje.

Paso de Rodillo Aereador

Definición: Es el paso de un cilindro metálico pesado con dientes o cuchillas, soldadas helicoidalmente a lo largo del mismo, que promueve el rejuvenecimiento de potreros.

Finalidad y Beneficios: El objetivo es incrementar la mayor disponibilidad de agua para los pastos del agostadero, a través de la descompactación de los agregados del suelo, el incremento de la infiltración, la disminución del escurrimiento superficial y reducir la erosión.

Surcado en Contorno

Definición: El surcado al contorno es una operación de labranza para el establecimiento de cultivos, que se realiza de forma perpendicular a la pendiente natural del terreno y siguiendo las curvas de nivel.

Finalidad y Beneficios: Aumentar la infiltración del agua, reducir la erosión hídrica, aumentar la humedad disponible para el crecimiento de las plantas, y reducir los riesgos de formación de cárcavas y canalillos.

Surcado Lister

Definición: Es una práctica mecánica en pastizales que consiste en establecer, en curvas a nivel, una serie de surcos dobles separados por un pequeño bordo empastado.

Finalidad y Beneficios: Captar el agua de lluvia entre los surcos dobles para favorecer los pastos naturales o introducidos, evitar la erosión de los suelos y mejorar la alimentación del ganado.

1.6.2 Obras

Cabeceo de Cárcavas.

Definición: El cabeceo consiste en el recubrimiento con materiales pétreos, de la parte más alta de una cárcava, para evitar su crecimiento longitudinal.

Finalidad y Beneficios: Evitar la erosión remontante producida por la concentración de escurrimientos superficiales y la socavación de la base de la cárcava por la caída de agua en el fondo de misma.

Suavizado de Taludes de Cárcavas

Definición: Es la actividad que se realiza para estabilizar los taludes en ambas márgenes de la cárcava, para controlar y reducir el escurrimiento superficial lateral, permitir el desarrollo de vegetación, y controlar el crecimiento de cárcavas ramificadas lateralmente.

Finalidad y Beneficios: Evitar el crecimiento lateral de las cárcavas por la erosión laminar del talud. Disminuir la pendiente de los taludes para evitar deslizamientos.

Presa Filtrante de Costales

Definición: Es una estructura permeable, que se ordena en forma de barrera o trinchera, usada para el control de la erosión en cárcavas y la retención de sedimentos. Esta obra se construye de costales rellenos de tierra que se colocan transversalmente al flujo del agua o escurrimiento.

Finalidad y Beneficios: Retener los sedimentos en suspensión, favorecer la infiltración, disminuir la velocidad del agua, estabilizar el lecho de la cárcava, y prolongar la vida útil de obras de almacenamiento aguas abajo.

Presas Filtrantes de Gaviones

Definición: Estructura de gravedad consistente en gaviones “cuatrapeados” que se colocan transversalmente al flujo del agua o escurrimiento. El gavión se define como cajas o canastas formadas por malla de alambre de acero galvanizado, las cuales se rellenan de piedra con el objeto de formar el cuerpo de la obra que constituye la presa de control.

Finalidad y Beneficios: Se recomiendan en corrientes turbulentas cuando se quiere evitar el azolvamiento de estructuras hidroagrícolas aguas abajo y/o el control de una cárcava.

Presas Filtrantes de Piedra Acomodada

Definición: Son estructuras de piedras ensambladas que coloca transversalmente, en forma de barrera, al flujo del agua, y que son utilizadas principalmente para el control del crecimiento de las cárcavas con pendientes moderadas.

Finalidad y Beneficios: Este tipo de obra permite retener sedimentos, incrementar la infiltración en el cauce, disminuye la velocidad del agua, estabiliza lechos de cárcavas y mejoran la calidad del agua escurrida.

Presa Filtrante de Troncos o Ramas

Definición: Es una estructura temporal para el control de la erosión en cárcavas pequeñas y angostas, apropiada para zonas forestales, compuesta de morillos y ramas entrelazadas, que se colocan transversalmente (en forma de barrera o trinchera) al flujo del agua o escurrimiento.

Finalidad y Beneficios: Es una estructura que reduce la velocidad del escurrimiento, retiene azolves y humedad, detiene el crecimiento de cárcavas, protege obras de infraestructura rural y permite la acumulación de sedimentos favorables para el establecimiento de cobertura vegetal en el cauce

Terrazas de Banco

Definición: Es una práctica mecánica que consiste en construir terraplenes o escalones formados por cortes y rellenos, contruidos en sentido perpendicular de la pendiente del terreno, y separados por paredes casi verticales o con talud protegidas con vegetación, piedra acomodada o mamposterías.

Finalidad y Beneficios: Reducir la velocidad del escurrimiento, minimizar la erosión del suelo, conservar la humedad del suelo y facilitar las labores de cultivo o la plantación de árboles. Permiten mecanizar áreas con topografía abrupta, promover el uso intensivo de la tierra, y aumentar los rendimientos.

Terrazas de Bancos Alternos

Definición: Sistema de terrazas constituido por una serie de bancales contruidos en forma alterna con fajas de terreno natural donde no se realiza ningún movimiento de tierra, este sistema de

terrazas se diseña para mejorar la configuración de terreno y lograr una mejor disponibilidad de este para las labores agrícolas.

Finalidad y Beneficios: Disminuir la velocidad de las aguas de lluvias, aumentar la infiltración del agua en el suelo, reducir el escurrimiento superficial, retener los sedimentos removidos por el flujo hídrico, captar agua, recolectar suelo y nutrientes, mejorar las condiciones de humedad del suelo y permitir el desarrollo de la vegetación

Terrazas de Base Ancha

Definición: Estas terrazas consisten de un bordo amplio que conforman por una serie de canales anchos o terraplenes, construidos con un espaciamiento regular y adecuado, a lo largo de contornos inclinados o a nivel, y sobre pendientes moderadas. Las terrazas se construyen con una inclinación (variable o uniforme), para propiciar el desagüe a velocidades erosivas hacia canales de conducción protegidos o hacia áreas de almacenamiento.

Finalidad y Beneficios: Interceptar la escorrentía, reducir la longitud de la pendiente para minimizar la erosión, y utilizar las separaciones entre las terrazas y el bordo para la producción de cultivos o forraje.

Terrazas de Base Angosta

Definición: Son un conjunto de zanjas y bordos construidos a nivel o con desnivel, cuyo volumen de excavación se coloca aguas abajo para conformar el bordo de tierra.

Finalidad y Beneficios: Formar áreas con condiciones favorables para laborables agropecuarias y forestales, reducir la velocidad de los escurrimientos, incrementar la infiltración del agua y disminuir la erosión de los suelos al modificar la pendiente del terreno y la longitud de la misma.

Terrazas de canal amplio o de Zingg

Definición: Es un sistema de captación de agua de lluvia in situ formado por un área de captación y un área perpendicular a la pendiente destinada a la producción de cultivos.

Finalidad y Beneficios: Su función es la de captar agua de lluvia para complementar las necesidades del cultivo que se establece en el canal amplio.

Muros de Contención

Definición: Es una estructura de contención rígida y a gravedad, hecha de mampostería o concreto, que se coloca en los laterales de cauces o caminos cuando las restricciones de propiedad, utilización de la estructura, o economía no permiten que las masas asuman sus pendientes naturales de reposo.

Finalidad y Beneficios: Su función es estabilizar y contener el deslizamientos de masas de tierra de gran magnitud que pueden afectar, por motivos de movimientos de tierras (excavaciones, cortes o terraplenes), áreas de cultivo, infraestructura hidroagrícola y/o caminos sacacosechas aguas abajo

Cerco Perimetral en Potreros

Definición: Son cercas de protección para evitar el libre tránsito del ganado que se construye con alambre de púas sujeto a postes.

Finalidad y Beneficios: Su objetivo es delimitar agostaderos y dividir potreros para evitar el sobrepastoreo, así como impedir el pastoreo y el pisoteo de los animales en áreas reforestadas, en bordos de almacenamiento, y en zonas de recarga de manantiales.

Cercos para División de Potreros

Definición: División de potreros generalmente con alambre de púas, en zonas de pastoreo, para impedir el paso de ganado hacia una área en rehabilitación (rotación de potreros).

Finalidad y Beneficios: Manejo de potreros acorde a la carga animal recomendada.

Guardaganados

Definición: Es una infraestructura que se construye para mantener el ganado dentro del área de los potreros.

Finalidad y Beneficios: Limitar el paso del ganado por caminos vehiculares, permitir el paso de vehículos en caminos de tránsito continuo

Cerco para áreas de exclusión

Definición: Son cercas de protección para evitar el tránsito del ganado en zonas de pastizales degradados, bosques o vegetación natural que se desea recuperar o que la zona alcance su vegetación clímax.

Finalidad y Beneficios: Delimitar áreas de vegetación natural o bajo manejo para evitar el paso de ganado de diferentes especies y así propiciar la propagación natural de la vegetación, el ramoneo de la revegetación y la conservación de las especies vegetales en extinción.

Silo de Trinchera

Definición: Es una fosa que actúa como almacén para forrajes, follaje de árboles forrajeros que se producen en la época de lluvias para la alimentación complementaria del ganado.

Finalidad y Beneficios: La conservación de forraje fresco para alimentar el ganado con forraje palatable y de buena calidad nutricional durante los periodos de escasez de alimento.

2. Análisis de frecuencias de eventos extremos

Para la estimación de los eventos hidrológicos asociados a cierto periodo de retorno se debe realizar un adecuado análisis de frecuencias de eventos extremos. Dicho análisis requiere de la determinación de las características estadísticas de la muestra, la aplicación de pruebas de homogeneidad e independencia, y de la obtención de la distribución de probabilidad que mejor ajusta a la muestra analizada.

2.1 Estadísticos muestrales

Las técnicas de estimación de parámetros de las distribuciones de probabilidad hacen uso de las características estadísticas de las series de tiempo analizadas. Las características principales son:

Media

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.1)$$

Donde:

n es el tamaño de la muestra.

\bar{x} es la media de la muestra

x_i son las variables aleatorias

Varianza no sesgada

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (2.2)$$

Coefficiente de asimetría no sesgado

$$g = \frac{\left\langle \frac{[n(n-1)]^{1/2}}{(n-2)} n^{1/2} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3 \right\rangle}{\left(\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right)^{(3/2)}} \quad (2.3)$$

Coefficiente de curtosis no sesgado

$$k = 3 + \left\langle \frac{(n-1)}{(n-2)(n-3)} \{[(n-1)g_1] + 6\} \right\rangle \quad (2.4)$$

Donde:

$$g_1 = \left\{ \frac{n \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{\left(\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right)^2} \right\} - 3 \quad (2.5)$$

Coefficiente de variación

$$Cv = \frac{S}{\bar{x}} \quad (2.6)$$

Debido a que las series hidrológicas se consideran relativamente cortas, se deben utilizar estos estadísticos no sesgados.

2.2 Período de retorno

El período de retorno se define como el número de años que transcurren en promedio para que un evento de magnitud dada x sea igualado o excedido por lo menos una vez en ese periodo de tiempo.

$$T = \frac{1}{P(X > x)} = \frac{1}{[1 - P(X \leq x)]} \quad (2.7)$$

Ley empírica de Weibull:

$$T = \frac{n+1}{m} \quad (2.8)$$

Donde

n tamaño de la muestra analizada en años.

m número de orden del registro.

Probabilidad de no excedencia:

$$F(X \leq x) = 1 - \frac{1}{T} \quad (2.9)$$

2.3 Pruebas de homogeneidad e independencia

Las características estadísticas de las series hidrológicas, como la media, desviación estándar y los coeficientes de correlación serial, se afectan cuando la serie presenta tendencia en la media o en la varianza, o cuando ocurren saltos negativos o positivos; tales anomalías son producidas por la pérdida de homogeneidad o consistencia.

En general, la falta de homogeneidad de los datos es inducida por las actividades humanas como la deforestación, apertura de nuevas áreas al cultivo, rectificación de cauces, construcción de embalses y reforestación. También es producto de los procesos naturales súbitos, como incendios forestales, terremotos, deslizamiento de laderas y erupciones volcánicas.

Las pruebas estadísticas que miden la homogeneidad de una serie de datos presentan una hipótesis nula y una regla para aceptarla o rechazarla. En este trabajo se aplican las técnicas de Helmert, t de Student y Cramer (Campos, 1987).

Adicionalmente, se emplea la prueba de independencia de Anderson para verificar si las muestras analizadas están formadas por variables aleatorias, requisito indispensable para aplicar el análisis de frecuencias.

Prueba estadística de Helmer

Esta prueba es sencilla y consiste en analizar el signo de las desviaciones de cada evento Q_i^j de la serie j para $i = 1, 2, \dots, n_j$, con respecto a su valor medio \bar{Q}^j . Si una desviación de un cierto signo es seguida de otra del mismo signo, entonces se dice que se forma una secuencia S , de lo contrario se considera como un cambio C .

La serie se considera homogénea si se cumple

$$-\sqrt{n_j - 1} \leq (S - C) \leq \sqrt{n_j - 1} \tag{2.10}$$

Prueba estadística t de Student

Cuando la causa probable de la pérdida de homogeneidad de la serie sea un cambio abrupto en la media, la prueba del estadístico t es muy útil.

Si se considera una serie Q_i^j para $i = 1, 2, \dots, n_j$, del sitio j , la cual se divide en dos conjuntos de tamaño $n_1 = n_2 = \frac{n_j}{2}$, entonces, el estadístico de prueba se define con la expresión

$$t_d = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\left[\frac{n_1 s_1^2 + n_2 s_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right) \right]^{1/2}} \tag{2.11}$$

Donde

\bar{x}_1, S_1^2 media y varianza de la primera parte del registro de tamaño n_1 .

\bar{x}_2, S_2^2 media y varianza de la segunda parte del registro de tamaño n_2 .

El valor absoluto de t_d se compara con el valor de la distribución t de Student de dos colas con $\nu = n_1 + n_2 - 2$ grados de libertad y para un nivel $\alpha = 0.05$. Sí y sólo si el valor absoluto de t_d es mayor que el de la distribución t de Student, se concluye que la diferencia entre las medias es evidencia de inconsistencia y por lo tanto la serie Q_i^j se considera no homogénea.

Prueba estadística de Cramer

Esta prueba se utiliza con el propósito de verificar homogeneidad en el registro Q_i^j de la serie j para $i = 1, 2, \dots, n_j$, y también para determinar si el valor medio no varía significativamente de un período de tiempo a otro. Con este propósito se consideran tres bloques, el primero, del tamaño total de la muestra n_j ; el segundo de tamaño n_{60} (60% de los últimos valores de la muestra n_j); y el tercero de tamaño n_{30} (30% de los últimos valores de la muestra n_j). La prueba compara el valor de \bar{Q}^j del registro total con cada una de las medias de los bloques elegidos \bar{Q}_{60}^j y \bar{Q}_{30}^j . Para que se considere la serie analizada como estacionaria en la media, se deberá cumplir que no existe una diferencia significativa entre las medias de los bloques.

$$\bar{Q}^j = \sum_{i=1}^{n_j} \frac{Q_i^j}{n_j}, \text{ para una sola muestra analizada } j = 1 \quad (2.12)$$

$$S_Q^j = \left[\frac{1}{(n_j - 1)} \sum_{i=1}^{n_j} (Q_i^j - \bar{Q}^j)^2 \right]^{1/2} \quad (2.13)$$

$$\bar{Q}_{60}^j = \sum_{k=1}^{n_{60}} \frac{Q_k^j}{n_{60}} \quad (2.14)$$

$$\bar{Q}_{30}^j = \sum_{k=1}^{n_{30}} \frac{Q_k^j}{n_{30}} \quad (2.15)$$

$$\tau_{60}^j = \frac{\bar{Q}_{60}^j - \bar{Q}^j}{S_Q^j} \quad (2.16)$$

$$\tau_{30}^j = \frac{\bar{Q}_{30}^j - \bar{Q}^j}{S_Q^j} \quad (2.17)$$

$$t_w = \left\{ \frac{n_w(n_j - 2)}{n_j - n_w [1 + (\tau_w^j)^2]} \right\}^{1/2} |\tau_w^j| \quad \text{para } w = 60 \text{ y } w = 30 \quad (2.18)$$

El estadístico t_w tiene distribución t de Student de dos colas con $\nu = n_1 + n_2 - 2$ grados de libertad y para un nivel $\alpha = 0.05$. Sí y solo si el valor absoluto de t_w , para $w = 60$ y $w = 30$, es mayor que el de la distribución t de Student, se concluye que la diferencia entre las medias es evidencia de inconsistencia y por lo tanto la serie Q_i^j se considera no homogénea.

Prueba de independencia de eventos

Para probar que la muestra Q_i^j de la serie j para $i = 1, 2, \dots, n_j$ esta compuesta por variables aleatorias, se puede aplicar la prueba de independencia de Anderson (Salas *et al*, 1988), la cual hace uso del coeficiente de autocorrelación serial r_k^j para diferentes tiempos de retraso k . Si se analiza un solo registro, entonces $j = 1$.

La expresión para obtener el coeficiente de autocorrelación serial de retraso k es:

$$r_k^j = \frac{\sum_{i=1}^{n_j-k} (Q_i^j - \bar{Q}^j)(Q_{i+k}^j - \bar{Q}^j)}{\sum_{i=1}^{n_j} (Q_i^j - \bar{Q}^j)^2}; \quad \text{para } r_0^j = 1 \text{ y } k = 1, 2, \dots, \frac{n_j}{3} \quad (2.19)$$

Donde

$$\bar{Q}^j = \sum_{i=1}^{n_j} \frac{Q_i^j}{n_j} \quad (2.20)$$

Además, los límites al 95% de confianza para r_k^j se pueden obtener como

$$r_k^j(95\%) = \frac{-1 \pm 1.96\sqrt{(n_j - k - 1)}}{n_j - k} \quad (2.21)$$

La gráfica de los valores estimados para r_k^j (ordenadas) contra los tiempos de retraso k (abscisas), junto con sus correspondientes límites de confianza, se llama correlograma de la muestra (Figura 2.1).

Si solo el 10% de los valores r_k^j sobrepasan los límites de confianza se dice que la serie Q_i^j es independiente y por lo tanto es una variable que sigue las leyes de la probabilidad.

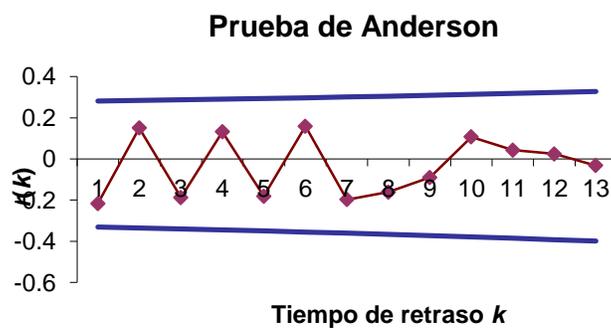


Figura 2.1 Correlograma de una serie de datos considerada como independiente.

2.4 Teoría distribucional

A continuación se presentan las principales características de la distribución de Valores Extremos Tipo I (EVI), también conocida como Gumbel, la cual será aplicada en este trabajo.

$$F(x) = e^{-e^{-\left[\frac{x-\nu}{\alpha}\right]}} \quad (2.22)$$

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} e^{-\left(\frac{x-\nu}{\alpha}\right)} e^{-e^{-\left(\frac{x-\nu}{\alpha}\right)}} \quad -\infty < x < \infty, \quad \alpha > 0 \quad (2.23)$$

La variable reducida Gumbel es

$$y_i = \frac{x_i - \nu}{\alpha} \quad (2.24)$$

Estimadores por momentos

$$\hat{\nu} = \bar{x} - 0.45 S \quad (2.25)$$

$$\hat{\alpha} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} S = 0.78 S \quad (2.26)$$

3. Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE)

Para la estimación de la erosión se han desarrollado modelos cualitativos y cuantitativos; entre los primeros destaca la cartografía de unidades homogéneas en función de parámetros como la erosividad de la lluvia, suelo y vegetación. Los modelos cuantitativos permiten la estimación numérica de la erosión y pueden evaluarse en forma directa o indirecta. La evaluación directa se desarrolla en el terreno, por la medición de sedimentos en el agua y los simuladores de lluvia, cuyos datos son extrapolados a zonas homogéneas. Los métodos de evaluación indirecta están asociados a modelos que son representaciones simplificadas de la realidad; entre estos se pueden distinguir modelos estadísticos, físicos o empíricos (Almorox *et al*, 1994).

Dentro de los modelos empíricos destaca la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, el cual es ampliamente usado para evaluar las pérdidas de suelo por erosión laminar y surcos. Su bondad depende del rigor con que sus componentes multiplicativas reproduzcan las condiciones del medio físico.

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE) es un criterio empírico (Wischmeir y Schmidt, 1978) que cuantifica el material sólido que se pone en movimiento como producto de la erosión hídrica y se expresa como

$$A = R K S L C P \quad (3.1)$$

Donde: A (ton/ha) es la pérdida anual de suelo, R (N/h) factor que mide el potencial erosivo de la lluvia, K (ton-h/N-ha) factor que toma en cuenta el tipo de suelo, SL factor de longitud y pendiente del terreno (adimensional), C factor de cobertura vegetal (adimensional) y P factor de prácticas de cultivo y conservación de suelos (adimensional).

Los valores base del factor C se obtienen de la siguiente tabla 3.1; en tanto que el factor SL se estima a partir de la información de la Tabla 3.2 obtenidas del Manual de Ingeniería de Ríos de la Comisión Nacional del Agua. El factor P se considera igual a uno cuando no existen prácticas de conservación en la zona.

Tabla 3.2. Valores generales de SL (CONAGUA, 1996)

Tipo de terreno	SL
Terrenos normalmente de cultivo ($S \leq 5\%$)	1.0
Terrenos de cultivo en temporal, con necesidades más o menos importantes de prácticas de conservación ($5 < S \leq 20\%$)	4.0
Terrenos forestales, pastizales o cultivos que requieren importantes medidas de conservación de suelos ($S > 25\%$)	7.0

En la literatura se pueden encontrar diferencias en la estimación de la erosión de suelos A y el aporte de sedimentos AS . El primero corresponde a la cuantificación del material sólido que se pone en movimiento debido a la erosión hídrica en un cierto periodo de tiempo. En tanto que el segundo corresponde al material sólido real que aporta la cuenca en su salida considerando el redepósito, así:

$$AS = DR A \quad (3.2)$$

Donde: AS (ton/ha) es el aporte de sedimentos, A (ton/ha) y DR es la relación de entrega de sedimentos, el cual se obtiene a partir de la expresión propuesta por el Servicio de Conservación de los Recursos Naturales del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA-NRCS, 1983):

$$DR = 0.417662Area^{-0.134958} - 0.127097 \quad (3.3)$$

Donde: Área (millas cuadradas) es la superficie de la cuenca analizada.

En particular, para el cálculo del factor R es común utilizar las expresiones propuestas por Cortés (1991). Él propuso la aplicación de ecuaciones de regresión para estimar el factor de erosivo en función de la lluvia anual para cada una de las regiones en que dividió la República Mexicana.

Un inconveniente que se observa en la aplicación de estas expresiones regionales es que abarcan grandes extensiones de superficie y no toma en cuenta la distribución espacial y temporal de la lluvia. Por ejemplo, una precipitación anual de 1500 mm en el estado de Chihuahua tendría el mismo potencial erosivo que en Tamaulipas. Más aún, estas expresiones no consideran el hecho que para un sitio los mismos 1500 mm pudieron formarse por un número menor de días con una mayor cantidad de lluvia, o por un número mayor de días y menor cantidad de lluvia, el primero de los casos generaría un factor erosivo R más grande.

Por lo anterior, en esta tesis se presenta una opción para el cálculo del factor R el cual está sustentado en el análisis de las lluvias acumuladas en 24 horas. A continuación se presentará la metodología.

Paso 1. En cada Estación Meteorológica Automatizada (EMA) se obtendrán las curvas masa de cada tormenta registrada en periodos de 24 h.

Paso 2. Para cada tormenta se obtienen los valores de las intensidades I_j y el máximo I_{30} para intervalos $T_j = 10$ min.

Paso 3. Con los valores del paso 2 y mediante la expresión (3.4) se calculan los factores R .

$$R = 1.702 \left\{ \left[\sum 1099 \left(1 - 0.72 \exp^{-1.27I_j} \right) (I_j T_j) \right] I_{30} \right\} / 100 \quad (3.4)$$

Donde: R (N/h) es el potencial erosivo de la lluvia, I_j (mm/h) es la intensidad de la precipitación para un incremento específico de tiempo T_j (h) e I_{30} (mm/h) es la intensidad máxima de la tormenta en 30 minutos.

Paso 4. Se genera una relación funcional entre el factor R y las láminas máximas anuales en 24 h. Con este modelo se pueden estimar los valores ajustados de R para láminas específicas de lluvia máxima en 24 h, ejemplo, 10, 11, 12, ..., 300 mm (Figura 3.1).

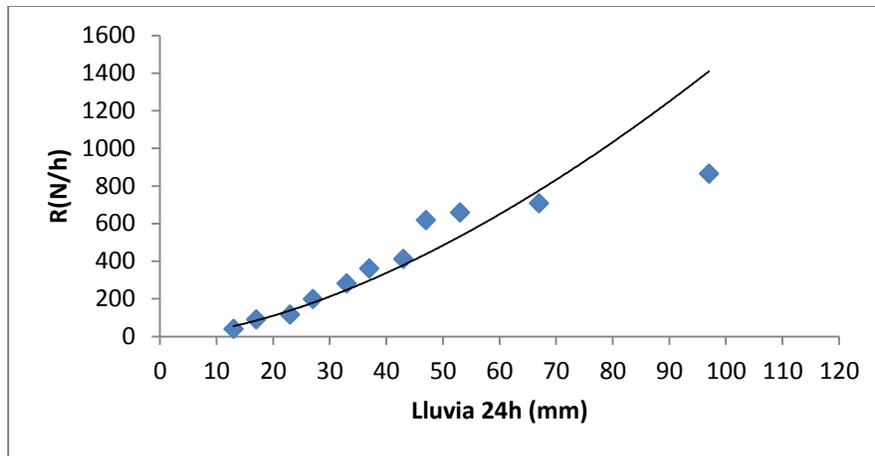


Figura 3.1 Relación funcional entre el potencial erosivo de la lluvia R y la lluvia acumulada en 24 horas.

Paso 5. Con esta relación funcional se obtiene el valor R de todas las tormentas que se generan en el primer año de la muestra de lluvia acumulada en 24h, considerando solo las tormentas mayores a 10 mm, las cuales son consideradas como erosivas.

Paso 6. Si se repite el procedimiento para todos los años disponibles $R^{1950}, R^{1961}, \dots, R^{2010}$ se tendrá una representación del compartimiento histórico de la pérdida de suelo $A^{1950}, A^{1961}, \dots, A^{2010}$. Esta serie presentará la componente cíclica del fenómeno.

Paso 7. Una vez se obtiene el valor de la erosión del suelo A^{anual} , se puede estimar el aporte anual de sedimentos AS^{anual} , el cual se difiere del primero en que éste último toma en cuenta el re-depósito de material sólido dentro de la cuenca, por lo que $A > AS$. Para estimar AS se emplean las expresiones (3.2) y (3.3).

4. Zona de Estudio

El estado de Puebla tiene una superficie de 34.251 kilómetros cuadrados. Limita al norte con el estado de Hidalgo; al este, con el estado de Veracruz; al sur, con Oaxaca y Guerrero; y al poniente con los estados de Morelos, México, Tlaxcala e Hidalgo.

Puebla está subdividida en 217 municipios (Figura 4.1), los que le colocan en la segunda posición entre las entidades federativas mexicanas según el número de estas subdivisiones territoriales (sólo por detrás de Oaxaca).

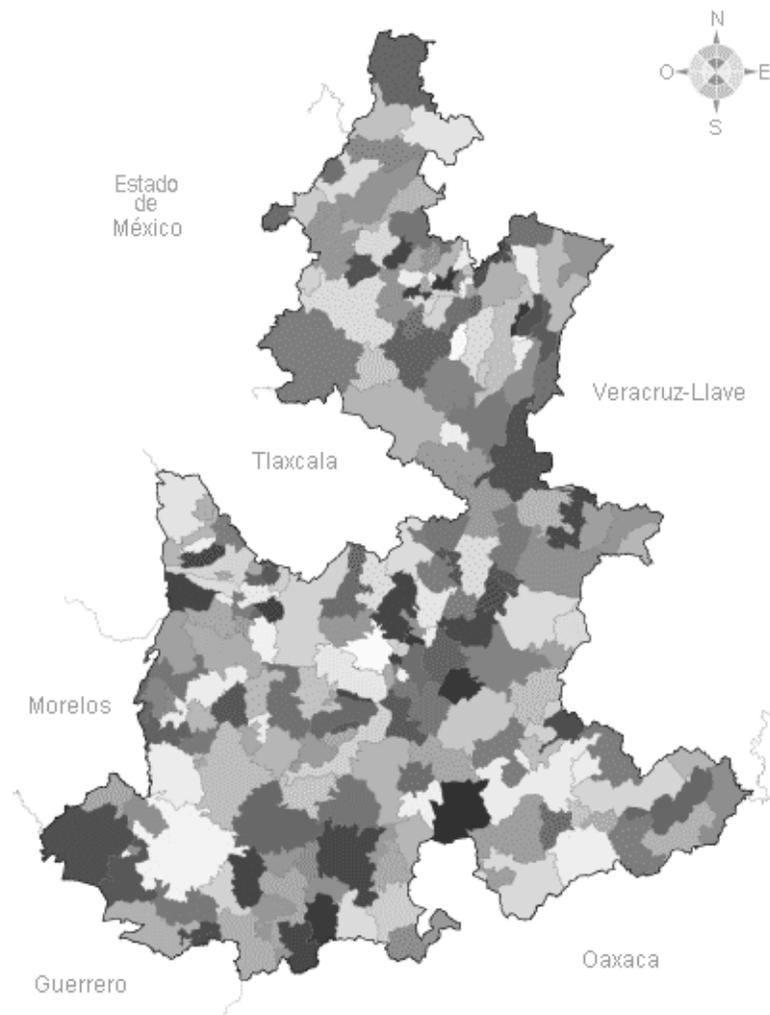


Figura 4.1 División municipal del estado de Puebla

La mayor parte del territorio poblano se encuentra en el Eje Neovolcánico. El clima es contrastante y va del frío de las altas montañas al cálido semidesierto de la Mixteca.

Su territorio está lleno de contrastes, aunque las cañadas y las serranías son una constante en la mayor parte de Puebla. El centro del estado está ocupado por el valle de Puebla-Tlaxcala, compartido con Tlaxcala. Este valle es amplio y de clima templado, con una altitud de 2.160 metros sobre el nivel del mar (msnm). Forma parte de la provincia fisiográfica X del Eje Neovolcánico.

El límite poniente del valle de Puebla es la Sierra Nevada, formada esencialmente por los volcanes Popocatepetl e Iztaccíhuatl. Alcanza alturas superiores a 5.000 msnm. Las cumbres de estos volcanes ocupan el segundo y tercer puestos por su elevación a nivel nacional.

La Sierra Nevada señala el límite poniente del valle Poblano-Tlaxcalteca y la frontera entre Puebla y los estados de México y Morelos.

Al sureste de la Sierra Nevada, el Eje Neovolcánico alberga numerosos valles de altitudes menores a medida que se avanza hacia el sur. El valle de Atlixco, de suelos negros, se localiza al suroeste del valle Poblano-Tlaxcalteca. Al sur de este valle comienza la Mixteca Poblana de abrupto relieve.

Entre los cerros que conforman la Sierra Mixteca —formada en realidad por numerosas cordilleras— se encuentran varios valles de clima cálido semiseco. Por su importancia económica destacan el Valle de Matamoros. Otros valles enclavados en la Mixteca son los de Chiautla y Acatlán, más bajos que el de Matamoros. Los valles de la Mixteca apenas sobrepasan los 1.000 msnm, y las montañas que los rodean difícilmente alcanzan los 2.000 msnm en los puntos más altos. La mayor altitud de la región es el cerro Tecorral, en el municipio de Izúcar de Matamoros, con 2.060 msnm.

Al oriente de la Mixteca Poblana se encuentra el valle de Tehuacán, que es una planicie alargada que se extiende desde el Valle de Tepeaca (que comprende los municipios de Tepeaca y Tecali de

Herrera) —paso entre el Poblano-Tlaxcalteca y el valle tehuacanero— hasta el sureste del estado. En el límite con Oaxaca, el Valle de Tehuacán se da lugar a la Cañada de Cuicatlán, que es un conjunto de fallas originadas por el plegamiento del Eje Neovolcánico, la Sierra Madre Oriental y la Sierra Madre del Sur.

El valle de Tehuacán está separado de la Mixteca por la Sierra de Zapotitlán, de mayor altura que la Sierra Mixteca, con altitudes superiores en varias ocasiones a los 2.000 msnm.

Al oriente del valle de Tehuacán se encuentra otra cordillera que comúnmente se conoce con el nombre de Sierra Negra de Tehuacán parte del Eje Neovolcánico y de abrupto relieve, con altitudes superiores a 2.000 msnm.

Al norte de la Sierra Negra y el valle de Ciudad Serdán se eleva el Pico de Orizaba, el punto más alto de México y límite entre Puebla y Veracruz. Al poniente al Citlaltépetl se encuentra el volcán Sierra Negra. El declive poniente de la Sierra Negra y el Citlaltépetl forman los Llanos de San Andrés (2.500 msnm) que descienden progresivamente hacia el poniente hasta el valle de Tepeaca y los Llanos de San Juan. Éstos constituyen la zona de transición entre el Eje Neovolcánico y la sección meridional de la Sierra Madre Oriental, que en Puebla toma el nombre de Sierra Norte de Puebla. Ocupa el norte de Puebla, en un espacio de cien kilómetros por cincuenta. La Sierra Norte se extiende hacia el territorio de Hidalgo y Tlaxcala; al tiempo que separa las mesetas del centro de Puebla y la Llanura Costera del Golfo. A esta última región natural corresponde una pequeña porción del extremo norte y noreste del territorio poblano.

El territorio poblano se encuentra sobre cuatro regiones hidrológicas mexicanas. Casi dos tercios del territorio corresponden a la región del Balsas que desemboca en el Océano Pacífico. De las cuencas que constituyen esta región, la del río Atoyac drena una superficie equivalente al 49% de la superficie poblana. El Atoyac recibe las aguas de numerosos afluentes, entre ellos el Zahuapan, el Nexapa, el Acatlán y el Mixteco. Porcentajes bastante menores corresponden a las cuencas de los ríos Amacuzac y Tlapaneco que se unen al Atoyac para dar origen al curso medio del río Balsas. En esta región se encuentran algunas presas importantes, destacando la Presa Valsequillo. Una de las grandes problemáticas de la región del Balsas es la presencia de una gran actividad

industrial en la zona. Ello implica un alto índice de contaminación de las corrientes superficiales y los mantos freáticos de la cuenca que a su vez tienen grandes repercusiones para el equilibrio de los ecosistemas y para las poblaciones humanas.

El resto del territorio poblano se encuentra dentro de tres regiones hidrológicas que desaguan en el Golfo de México. La región del Pánuco representa menos del 1% de la superficie del estado y corresponde a una pequeña sección en el municipio de Honey. Segunda en importancia es la región del Tuxpan-Nautla, con 23% de la superficie estatal. Está subdividida en cuatro cuencas que tienen sus fuentes en la Sierra Norte de Puebla. La cuenca del río Tecolutla desagua más del 16% de la superficie de Puebla. Recibe las aguas de ríos como el Apulco, el Laxaxalpa y el Necaxa. Sobre este último se encuentra la Presa Necaxa. El relieve de la cuenca alta del Tecolutla origina saltos de agua que constituyen un atractivo turístico. Algunas de ellas son Las Brisas (Cuetzalan del Progreso) y San Pedro Atmatla (Zacatlán). Al norte de la cuenca del río Tecolutla se encuentra el río San Marcos, perteneciente a la cuenca del río Cazones. El extremo norte de Puebla forma parte de la cuenca del río Tuxpan, donde corre el caudaloso río Pantepec. Las inundaciones del Pantepec han ocasionado varios desastres naturales en la región, como en 1999, cuando más de cien familias de Huehuetla (Hidalgo) perdieron sus casas y 254 personas fueron arrastradas por la corriente del río en la Sierra Norte de Puebla.

La tercera región hidrológica en importancia en el estado de Puebla es la región del Papaloapan, en el sureste del estado y drena alrededor de 17% de la superficie. El caudaloso río Papaloapan tiene sus fuentes en el árido valle de Tehuacán, donde nacen los ríos Tehuacán y Zapotitlán. Ya en la Llanura Costera del Golfo de México, el Papaloapan recibe las aguas de otros ríos nacidos en la vertiente oriental de la Sierra Negra de Tehuacán, como el Coyolapa y el Petlapa. Pertenecen también a esta región una pequeña porción de la cuenca del río Jamapa, en la Sierra de Quimixtlán al norte del Citlaltépetl.

Los climas dominantes en el territorio poblano son los climas templados, con diversos grados de humedad. La tercera parte del territorio posee un clima templado subhúmedo con lluvias en verano. Esta porción corresponde a la región del centro del estado, donde se encuentran los valles de Puebla-Tlaxcala y Atlixco, la vertiente meridional de la Sierra Norte de Puebla y la vertiente

occidental de la Sierra Negra de Tehuacán. La falta de lluvias en estas regiones se explica en parte por la presencia de las altas montañas en el oriente del estado, que impiden el paso de las nubes cargadas de humedad provenientes del Golfo de México. En esta porción del territorio poblano las temperaturas anuales son de 16 °C en promedio, y la pluviosidad oscila entre los 600 y 800 mm anuales. La estación de más lluviosa es el verano. Igualmente con temperaturas templadas, pero con mayor humedad, son algunas zonas de las regiones medias de las sierras de Tehuacán, Nevada, Norte y el Citlaltépetl. En conjunto, los espacios con clima templado en Puebla suman alrededor de 40% de la superficie del territorio.

Otro 39% corresponde a los climas cálidos. Estos corresponden a las regiones de la Mixteca Poblana y la vertiente oriental de las sierras Norte y de Tehuacán, así como la región de la Sierra de Quimixtlán, en el centro oriente del estado. Las temperaturas cálidas se deben a una menor altitud en comparación con ámbitos geográficos como el valle de Puebla. Por poner un ejemplo, en la Mixteca las cumbres de los cerros rara vez rebasan los 2000 msnm, en tanto que el valle de Puebla tiene una altitud de 2160 msnm. Una situación distinta es la de las vertientes orientales del estado. Además de encontrarse a una altitud menor en comparación con las mesetas del altiplano, se hallan más próximas a la costa del Golfo. Esto también establece una diferencia fundamental entre la Mixteca y las otras regiones de clima cálido en Puebla: la Mixteca es bastante más seca que la Sierra Norte y la Sierra Negra de Tehuacán. Mientras que la estación meteorológica de Piaxtla (Mixteca Poblana) registra una pluviosidad promedio de 727 mm anuales, las isoyetas de la Sierra Negra superan los 3000 mm y las correspondientes a la Sierra Norte alcanzan los 4000 mm.

Poco más del 18% de la superficie de Puebla posee algún tipo de climas secos o semisecos. Se trata principalmente de la parte sur del valle de Tehuacán y los Llanos de San Juan y de San Andrés, localizados tras las altas montañas del oriente del estado. Otra región con este tipo de clima se encuentra en el sur de la Mixteca, en el límite con Oaxaca y Guerrero. Las temperaturas en estas regiones oscilan entre los 16 °C y 22 °C. La pluviosidad es relativamente más escasa que en el resto del estado. En Oriental (Llanos de San Juan), las lluvias en promedio no rebasan los 500 mm anuales, mientras que en Ciudad Serdán rondan los 400 mm.

Para este estudio se cuenta con la información de la lámina de lluvia acumulada en 24 horas de 145 estaciones climatológicas del periodo 1950 a 2010, las cuales se encuentran localizadas de acuerdo con la Figura 4.2. Así mismo, existen 4 estaciones meteorológicas automatizadas, las cuales proporcionarán la información de la variación de la precipitación para cada 10 minutos en el periodo 2006 a 2010. La Figura 4.3 presenta la ubicación de estas cuatro EMAS.

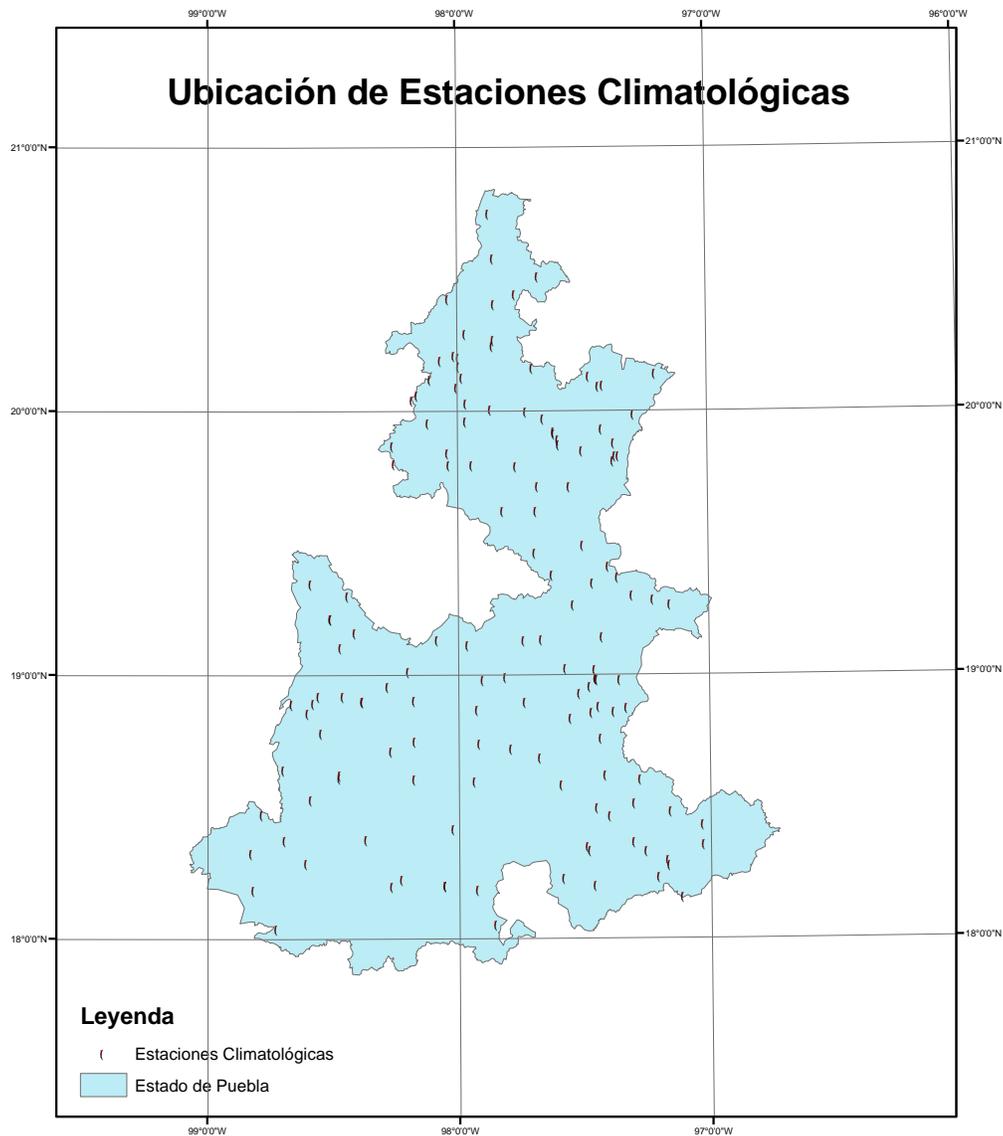


Figura 4.2 Ubicación de las estaciones climatológicas empleadas en este estudio.

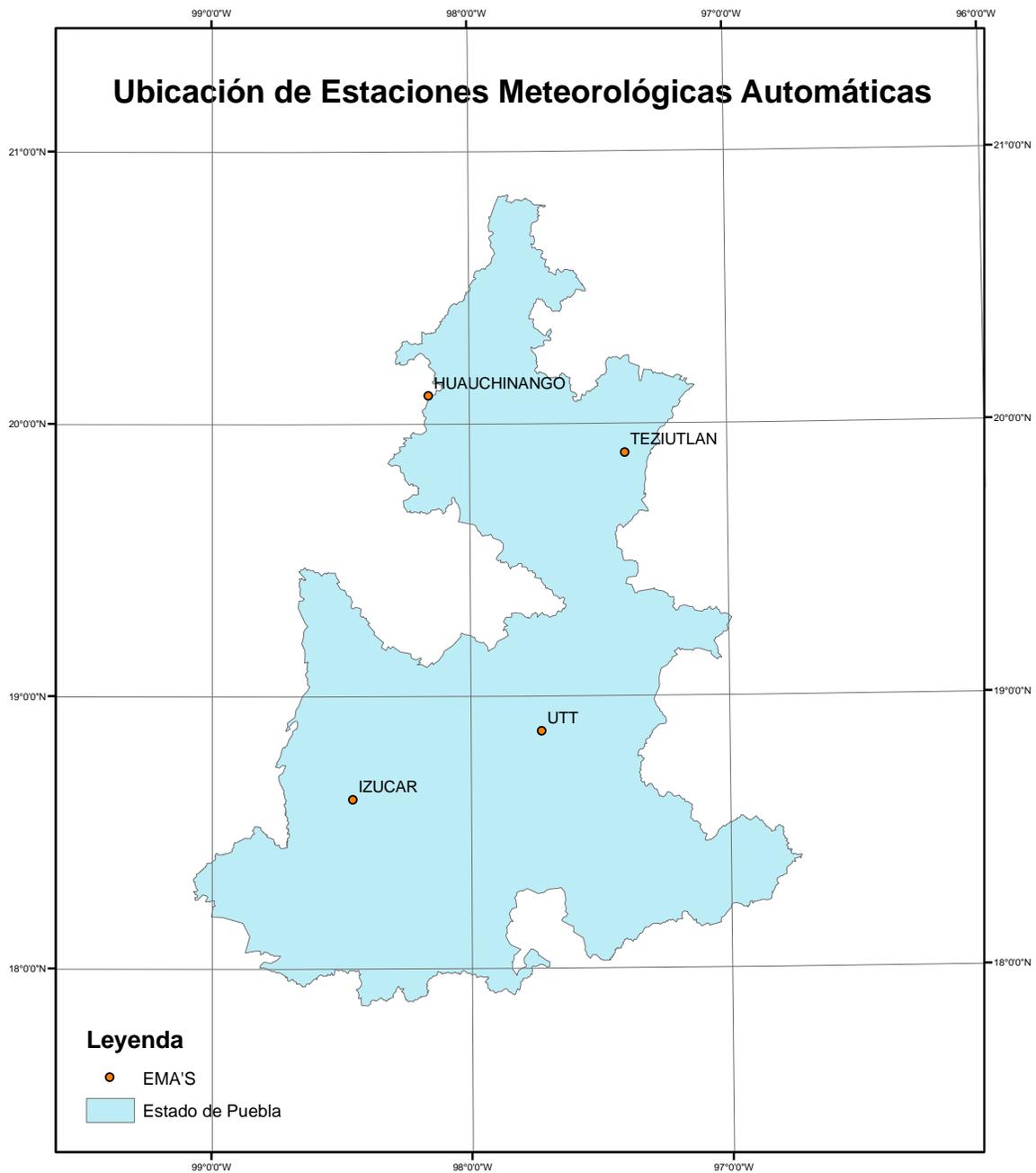


Figura 4.3 Ubicación de las estaciones meteorológicas automatizadas empleadas en este estudio.

La variación espacial de la precipitación media anual en el estado de Puebla se obtuvo al procesar la información de las 145 estaciones climatológicas, el plano de isoyetas resultantes se muestra en

la Figura 4.4, en donde puede apreciarse que las mayores concentraciones de la precipitación se dan en la parte norte y sureste del estado.

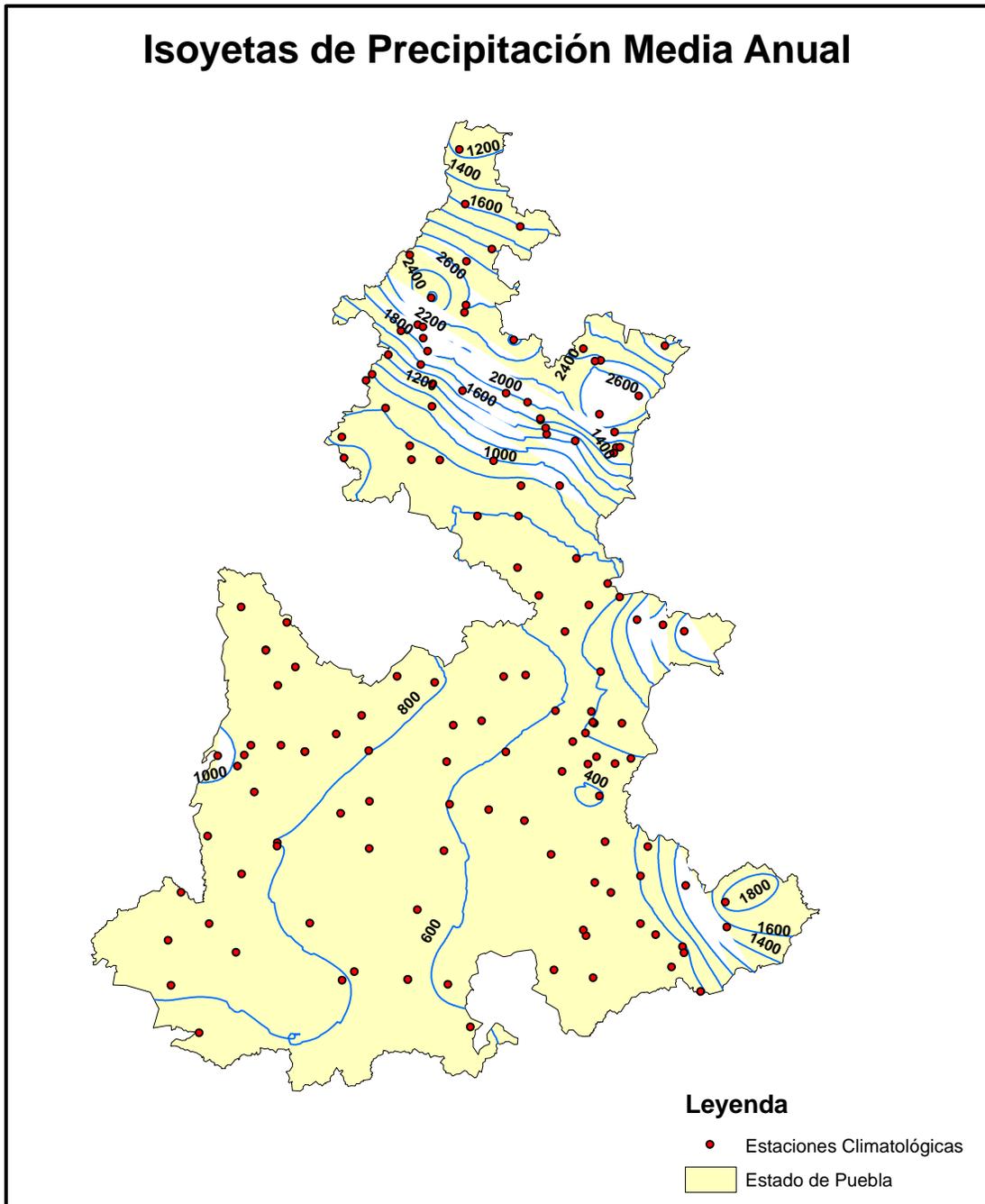


Figura 4.4 Isoyetas de precipitación media anual del estado de Puebla

El primer paso consiste en obtener las curvas masa de cada tormenta registrada en cada una de las cuatro estaciones meteorológicas automatizadas (Figura 4.5). Sólo se toman en cuenta aquellas tormentas cuya lluvia acumulada es mayor a 10 mm, las cuales son consideradas como erosivas.

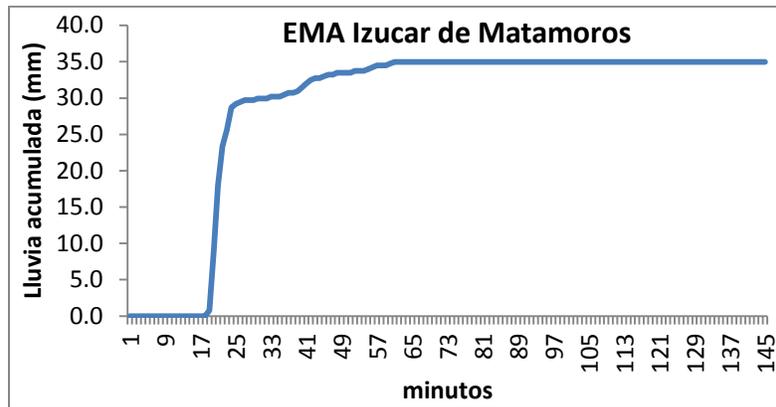


Figura 4.5 Curva masa de tormentas acumuladas en 24 horas mayores a 10 mm

Para el conjunto de tormentas del paso anterior, se obtienen mediante la ecuación 3.4 los valores del potencial erosivo de la lluvia **R**. En la Tabla 4.1 se presentan algunos valores obtenidos para las lluvias de la estación Izúcar de Matamoros.

Tabla 4.1 Algunos valores del potencial erosivo de la lluvia R para la EMA “Izúcar de Matamoros”

No.	HPmáx 24 h (mm)	HPmáx 24 h (in)	Int. máxima I ₃₀ (in/h)	EI ₃₀ 100ft*tonf*in/acre*h	EI ₃₀ (cte=1.702) R(N/h)
1	12.0	0.5	0.5	1.6	2.7
2	17.8	0.7	0.8	4.5	7.7
3	18.0	0.7	0.9	4.6	7.9
4	26.6	1.0	1.1	7.7	13.1
.
.
.
<i>N</i>	64.5	2.5	1.3	24.0	40.8

A partir de estos valores es posible encontrar relaciones funcionales como el de la Figura 3.1 para las cuatro estaciones meteorológicas automatizadas disponibles en este estudio.

En las Figuras 4.6 a 4.9 se muestran dichas relaciones para las cuatro EMAs.

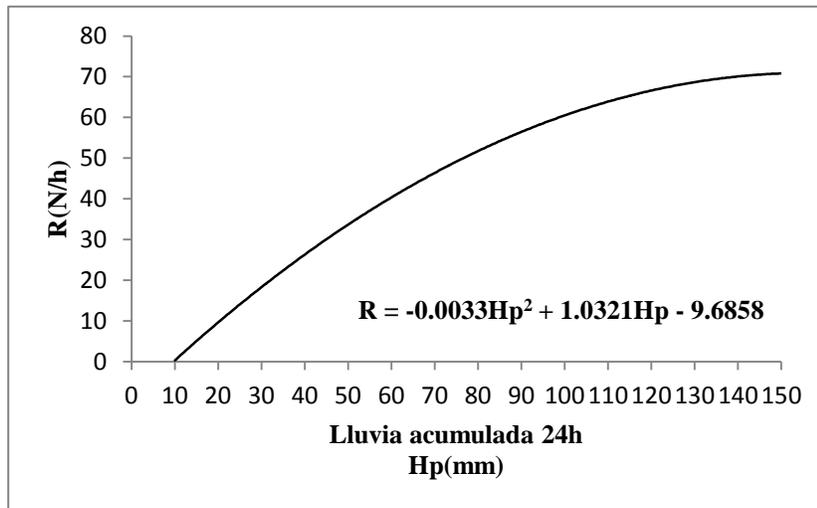


Figura 4.6 Relación funcional entre el potencial erosivo de la lluvia R y la lluvia acumulada en 24 horas para la estación Izúcar de Matamoros.

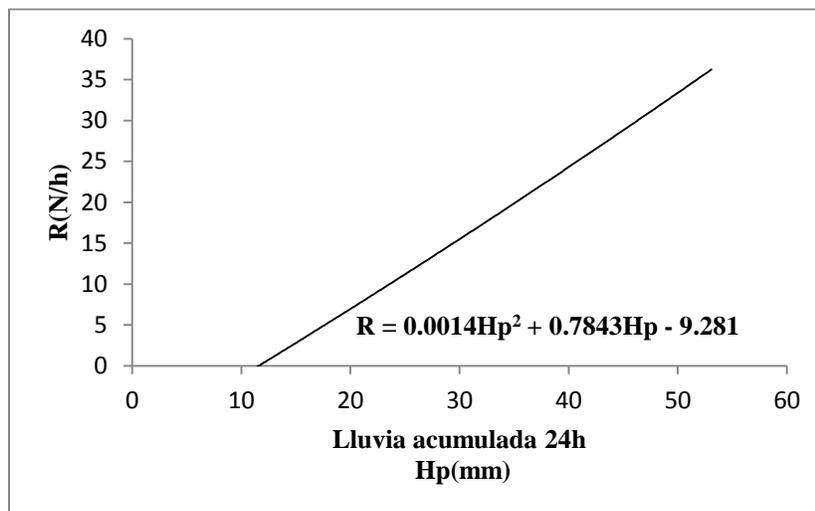


Figura 4.7 Relación funcional entre el potencial erosivo de la lluvia R y la lluvia acumulada en 24 horas para la estación Tecamachalco (UTT)

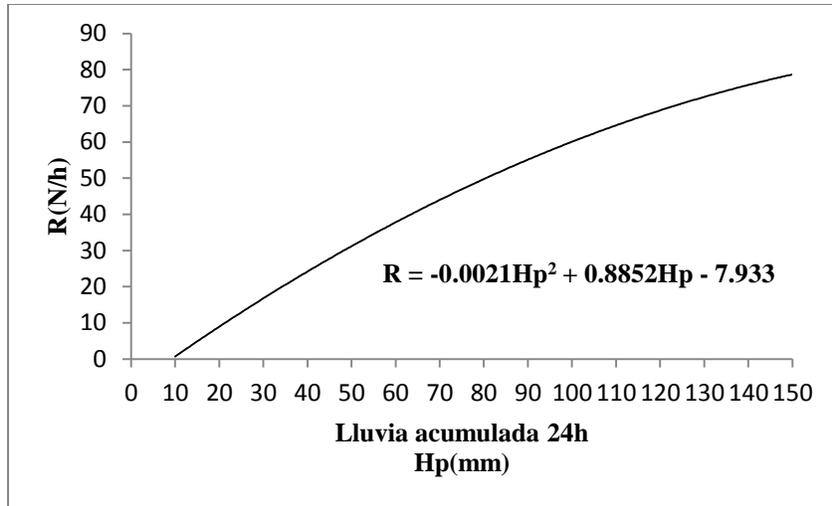


Figura 4.8 Relación funcional entre el potencial erosivo de la lluvia R y la lluvia acumulada en 24 horas para la estación Teziutlán

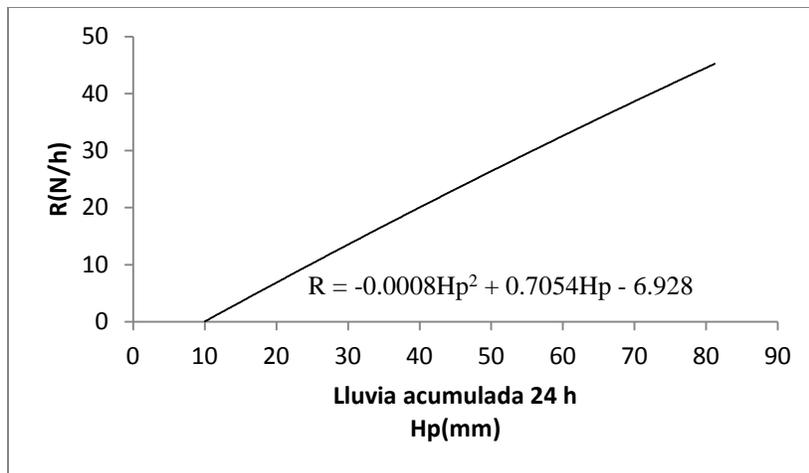


Figura 4.9 Relación funcional entre el potencial erosivo de la lluvia R y la lluvia acumulada en 24 horas para la estación Huauchinango

Para obtener los valores correspondientes en cada una de las 145 estaciones climatológicas disponibles, solo es necesario sustituir los valores de lluvia acumulada en 24h mayores de 10 mm en la relación funcional correspondiente de la EMA más cercana. Con este procedimiento es posible obtener el valor del potencial erosivo anual al sumar todos los valores diarios del factor R . En la Figura 4.10 se muestra la serie de tiempo para el caso de la estación climatológica 21002.

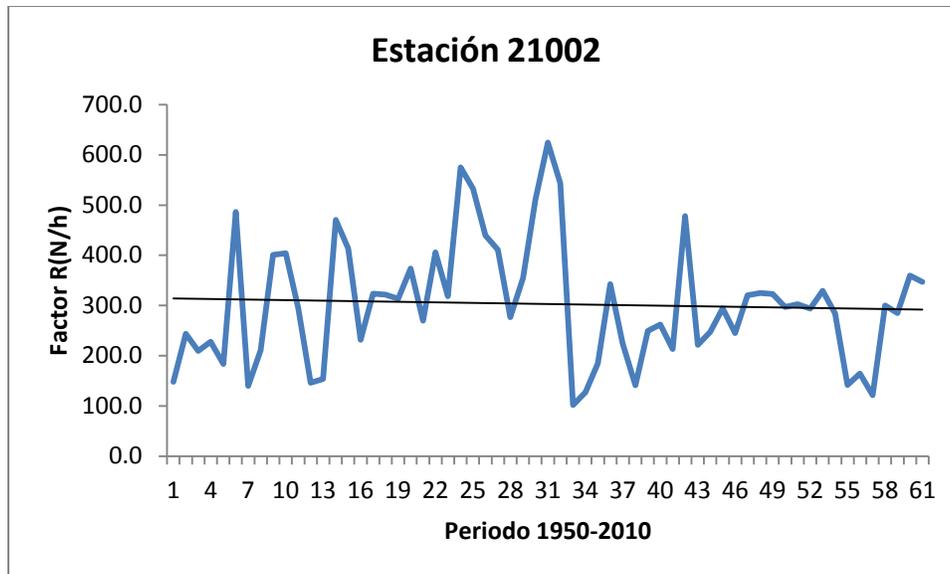


Figura 4.10 Variación del factor erosivo anual del periodo 1950-2010 en la estación climatológica 21002.

En la Tabla 4.2 se muestran las características estadísticas de la serie de factor erosivo anual para algunas estaciones seleccionadas. En esta Tabla se puede observar como el factor erosivo medio anual presenta grandes variaciones que dependen de la situación geográfica de la estación, así, este valor puede variar de 202.5 N/h (Estación 21010) a 2068.3 N/h (Estación 21011).

Una vez que se obtiene este tipo de series de tiempo es posible construir un mapa de isoclinas del factor erosivo medio anual, el cual se muestra en la Figura 4.11.

Tabla 4.2 Características estadísticas de la serie de factores erosivos anuales para algunas estaciones seleccionadas.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Estación	21002	21003	21004	21005	21006	21007	21008	21009	21010	21011
Media	303.1	381.1	381.1	348.8	1173.9	327.4	323.9	1316.3	202.5	2068.3
S	121.2	152.9	152.9	142.5	355.7	103.7	123.0	608.7	96.2	605.2
G	0.57	0.34	0.34	2.70	-0.08	0.38	0.94	1.11	1.39	-0.45
K	2.96	4.63	4.63	16.94	2.88	3.80	6.18	6.43	6.50	3.54
Cv	0.40	0.40	0.40	0.41	0.30	0.32	0.38	0.46	0.47	0.29

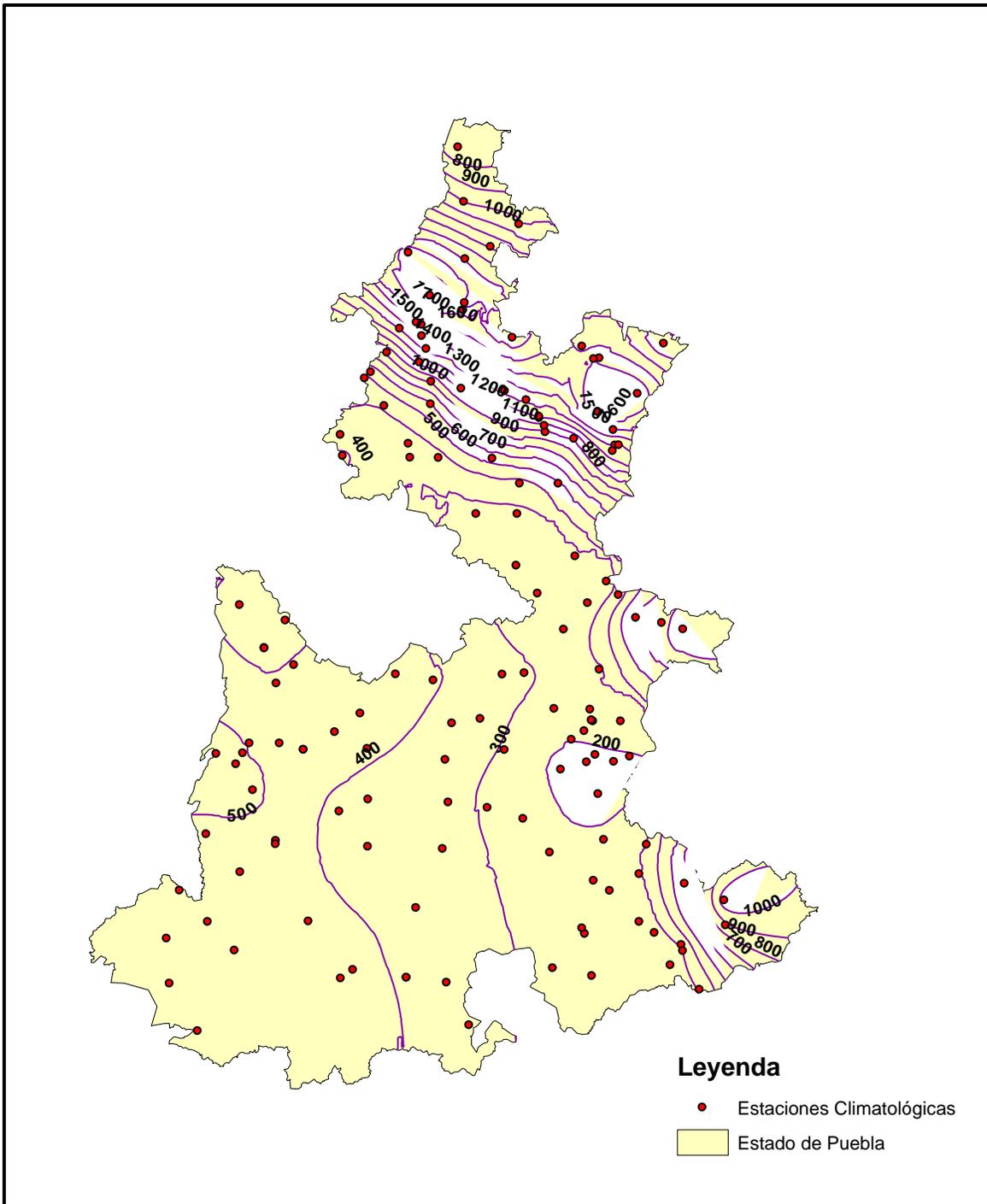


Figura 4.11 Isolíneas del factor erosivo de lluvia anual

Las series de tiempo como las mostradas en la Figura 4.10 fueron evaluadas para determinar si se pueden considerar como Homogéneas e invariantes en el tiempo. Para tal efecto, se utilizaron las

pruebas estadísticas del apartado 2.3 de esta tesis. Como resultado de este análisis, en la Figura 4.12 se indican las estaciones que son consideradas desde el punto de vista estadístico como homogéneas o no homogéneas.

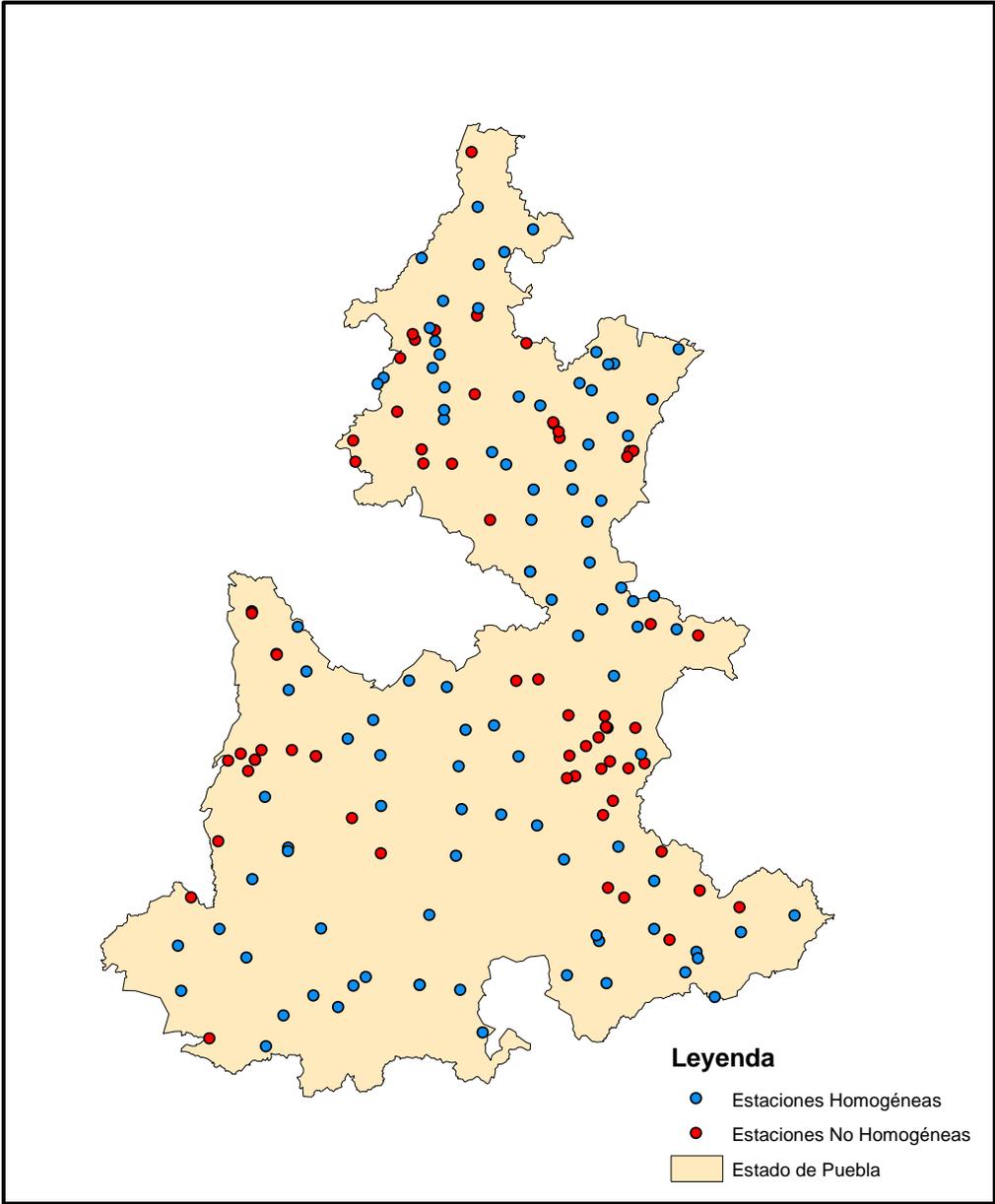


Figura 4.12 Ubicación de las estaciones cuyas series de factor erosivo anual son consideradas desde el punto de vista estadístico como homogéneas o no homogéneas.

De la Figura anterior es evidente que existen un grupo importante de estaciones que son consideradas como no homogéneas y que presentan una tendencia positiva, esto es, que los valores del factor erosivo anual se han incrementado con el tiempo.

Para tomar en cuenta este incremento temporal, es conveniente emplear en la ecuación universal de pérdida de suelo (ecuación 3.1) el valor del factor R asociado a cierto periodo de retorno (5 ó 10 años) en lugar de su valor esperado anual (Figura 4.12). Con este propósito, la distribución de valores extremos tipo I (Ecuación 2.22) es ajustada a cada una de las series de factor erosivo anual (Tabla 4.3). En la Figura 4.13 se muestra el ajuste para el caso de la serie de la estación climatológica 21002. En la Tabla 4.4 se enlistan los eventos de diferente periodo de retorno para algunas estaciones, mientras que en las Figuras 4.14 y 4.15 se muestran los Mapas de 5 y 10 años.

Tabla 4.3 Parámetros de la distribución Gumbel ajustado a la serie de factores erosivos anuales para algunas estaciones seleccionadas.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	21002	21003	21004	21005	21006	21007	21008	21009	21010	21011
μ	251.52	316.61	316.61	291.57	894.51	252.58	264.23	1149.87	178.71	1561.00
α	481.67	606.63	606.63	560.40	1635.21	465.04	501.54	2258.08	352.60	2837.51

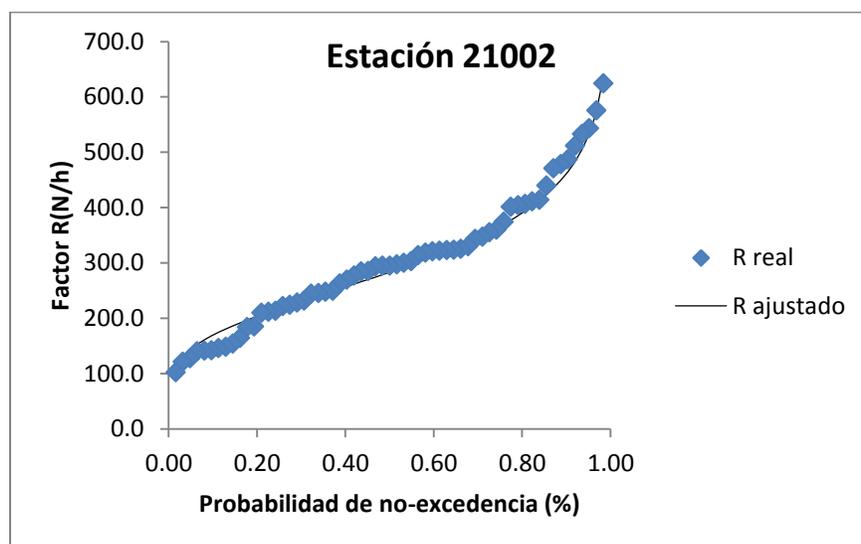


Figura 4.13 Series empírica y ajustada del factor erosivo anual de la estación 21002

Tabla 4.4 Eventos de diseño de diferente periodo de retorno para la serie de factores erosivos anuales para algunas estaciones seleccionadas.

T(años)	F(x)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		21002	21003	21004	21005	21006	21007	21008	21009	21010	21011
2	0.50	283	356	356	325	1115	310	304	1216	187	1969
5	0.80	390	491	491	451	1430	402	412	1755	272	2504
10	0.90	461	581	581	535	1638	463	484	2111	328	2858
20	0.95	529	667	667	615	1838	521	554	2453	382	3198

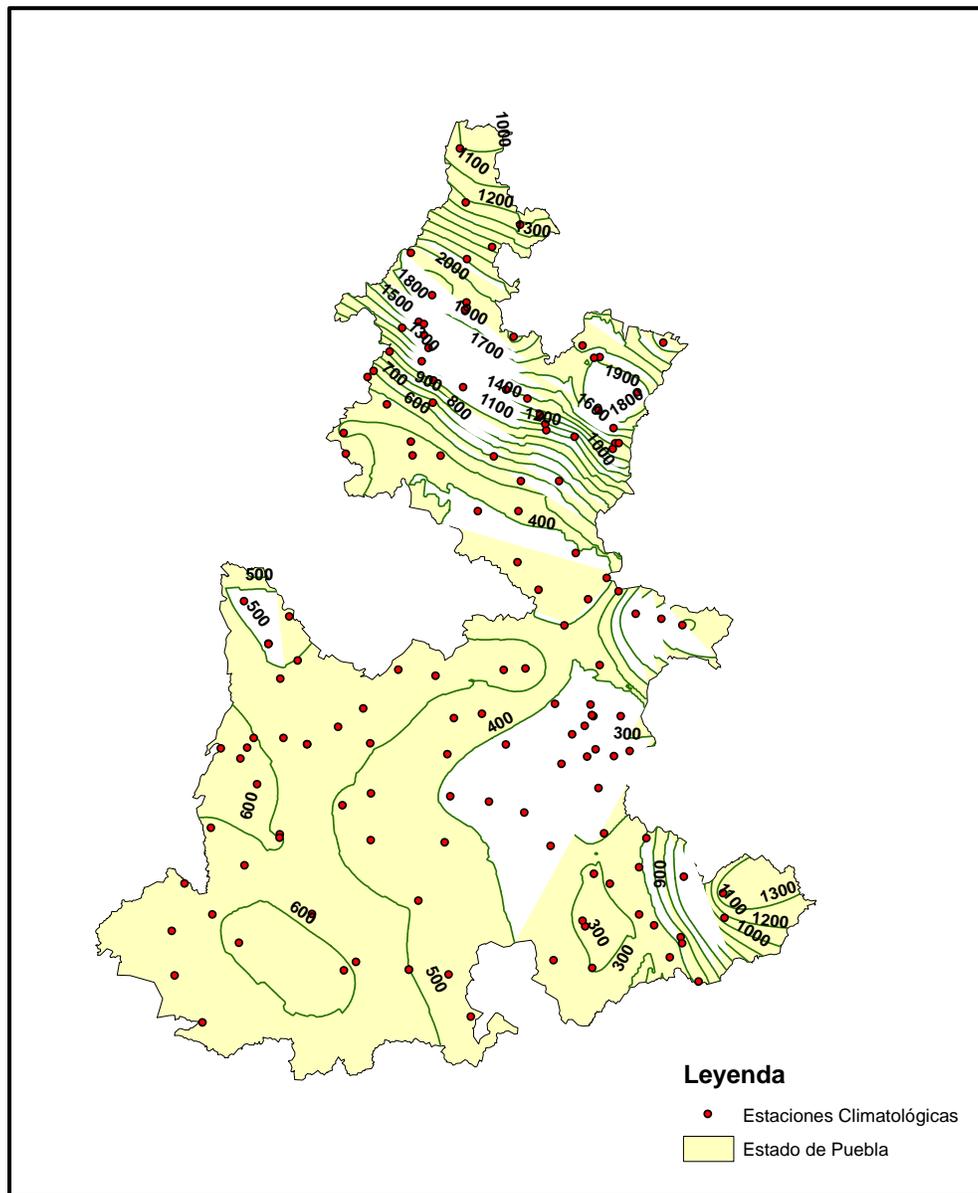


Figura 4.14 Isolneas del factor erosivo anual asociado a 5 años periodo de retorno

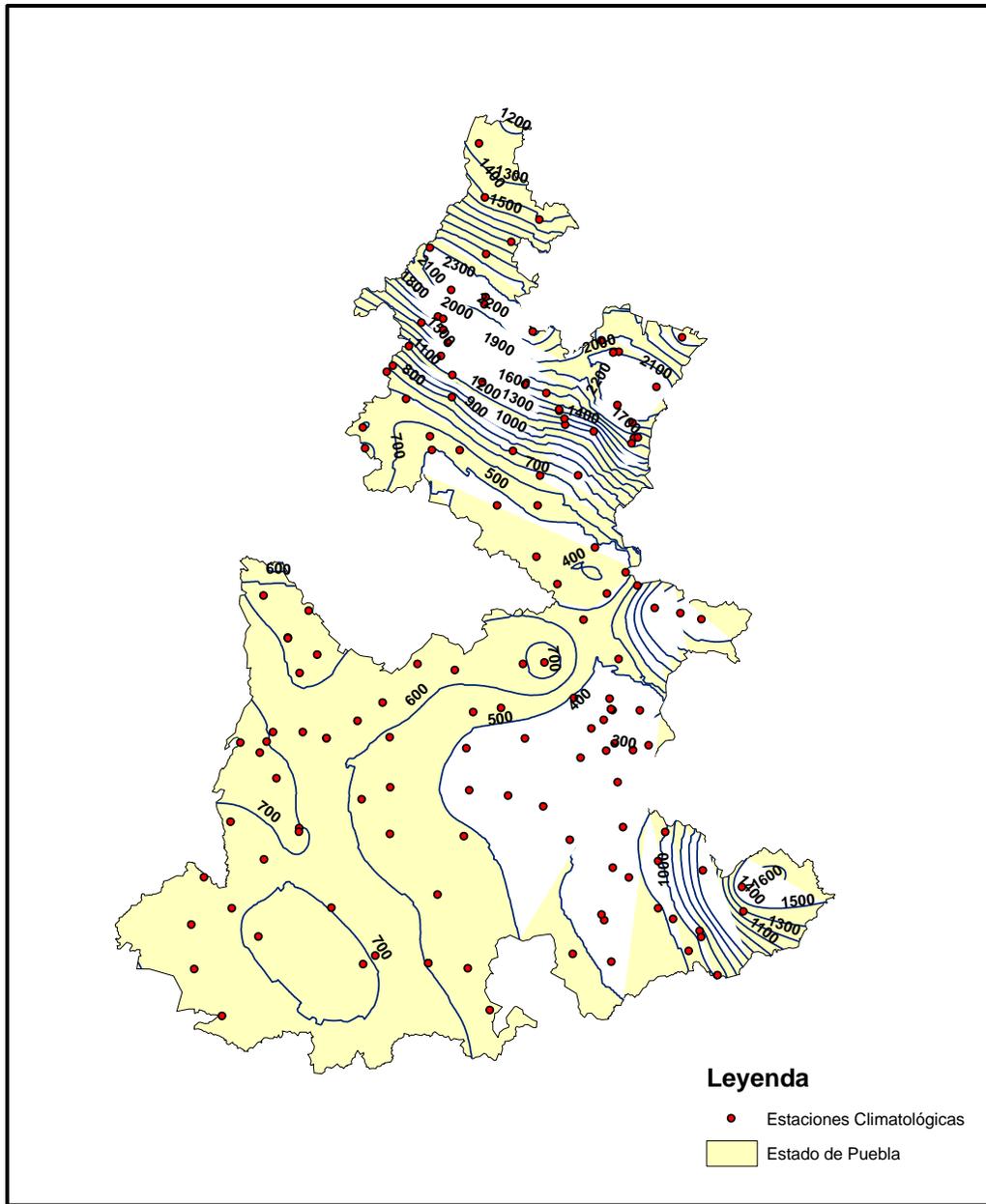


Figura 4.15 Isolneas del factor erosivo anual asociado a 10 años periodo de retorno

5. Conclusiones y Recomendaciones

A partir de las lecturas de la precipitación proporcionadas por las EMAs y las estaciones climatológicas del estado de Puebla, complementadas con la aplicación de técnicas estadísticas, pudo trazarse un mapa de isoyetas de precipitación media anual, en donde se puede apreciar que las mayores concentraciones de la precipitación se dan en la parte norte y sureste del estado.

Con los valores del factor R anual, estimados para el periodo comprendido entre el año de 1950 y 2010, de cada una de las estaciones climatológicas estudiadas, se obtuvo un mapa de isolíneas del factor erosivo de lluvia anual, permitiéndonos determinar que la potencialidad erosiva aumenta en el norte y sureste, coincidiendo con las tendencias de las precipitaciones anuales.

Al hacer el análisis de la homogeneidad del factor erosivo anual, se demostró que existe un grupo importante de valores que presentan una tendencia positiva, lo cual implica un incremento a través del tiempo, por lo cual fue necesario aplicar a los mismos el análisis de frecuencias, para así confirmar, a través de los dos mapas resultantes de isolíneas del factor erosivo anual asociado a 5 y 10 años periodo de retorno, respectivamente, que es evidente como R seguirá en aumento en gran parte del estado de Puebla.

Debido a los incrementos del factor erosivo de la lluvia, se recomienda dejar de diseñar con valores de R media, como se hace comúnmente, sobre todo en las zonas del norte y sureste del estado, ya que es ahí en donde se observó un mayor número de estaciones consideradas no homogéneas, utilizando en su lugar los valores del factor R para periodos de retorno de 5 ó 10 años, según los requerimientos del proyecto.

Así mismo, al ser inevitable que la lluvia cause cada día más erosión al suelo, se hace la recomendación de tomar medidas y acciones para la conservación, uso y manejo sustentable de éste; a través de proyectos integrales, en la construcción, establecimiento y desarrollo de obras y prácticas orientadas a su recuperación.

Referencias

- Almorox, J. R., A. De Antonio, M. Saa, M. Cruz y J. M. Gasco. Métodos de estimación de la erosión hídrica. Editorial Agrícola Española. S. A. Madrid, España. 150 pp. 1994.
- Campos Aranda Daniel, Procesos del Ciclo Hidrológico, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ingeniería, S.L.P., México, 1987.
- CONAGUA. Manual de Ingeniería de Ríos: Capítulo 17, Pérdida de Suelos en Cuencas. Comisión Nacional del Agua. México. 35 pp. 1996.
- Cortés T. H., Caracterización de la erosividad de la lluvia en México utilizando métodos multivariados. Tesis de maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. 168 p. 1991.
- Guevara, E. Manejo integrado de cuencas. Documento de referencia para los países de América Latina. FAO. RCL/97/04-FOR-54. Chile. 14 pp. 1997.
- Honorato, R., L. Barrales, I. Peña I y F. Barrera. Evaluación del modelo USLE en la estimación de la erosión en seis localidades entre la IV y IX región de Chile. Ciencia e Investigación Agraria. 28(1): 7-14. 2001.
- Kite G. W. 1988. *Frequency and Risk Analyses in Hydrology*. Water Resources Publications. USA. 264pp.
- SAGARPA, Reglas de Operación de los Programas de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, 2010.
- SEMARNAT, Compendio de Estadísticas Ambientales, 2008.
- SEMARNAT, El Medio Ambiente en México en Resumen, 2009.
- Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales, Informe sobre la Situación del Medio Ambiente en México, 2008.
- Subsecretaría de Desarrollo Rural, Lineamiento Operativos Específicos para la Aplicación de Recursos del Componente Conservación y Usos Sustentable de Suelo y Agua (COUSSA) del Programa de Sustentabilidad de los Recursos Naturales, 2011.

- USDA-NRCS. Sediment sources, yields and delivery ratios. Chapter 6 in National Engineering Handbook, Section 3, Sedimentation. US Department Agriculture, Natural Resources Conservation Service, pp. 6.2-6.19. 1983.
- Wischmeir, W. H. y D. D. Smith. Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. USDA. Agricultural Handbook. No. 537. 58 pp. 1978.

Mesografía

- https://www.codelcoeduca.cl/minisitios/docentes/pdf/naturales/1_naturales_NM1.pdf
- <http://elearning.semarnat.gob.mx/cte/MATERIALESAPOYO/manejo%20de%20recursos%20naturales%20y%20planeaci%C3%B3n%20ambiental/INTERMEDIO/1.html>
- <http://www.unccd.int/main.php>
- <http://www.inegi.org.mx>