



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACION EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE EDAFOLOGIA

**IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS
DEGRADADAS, POR EROSIÓN EN
CÁRCAVAS, EN EL EJE
NEOVOLCÁNICO MEXICANO**

PAULA ERIKA ZAMORA TIRADO

T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE :

MAESTRÍA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO

2014

La presente tesis titulada: IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS DEGRADADAS, POR EROSIÓN EN CÁRCAVAS, EN EL EJE NEOVOLCÁNICO MEXICANO

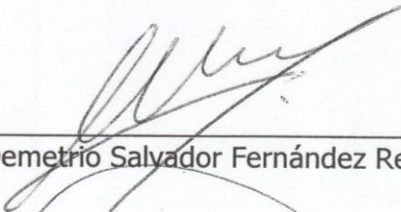
realizada por el alumno: PAULA ERIKA ZAMORA TIRADO

bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS
EDAFOLOGIA

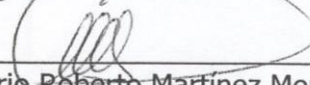
CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



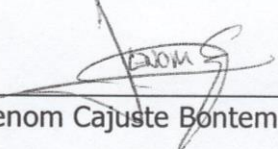
Dr. Demetrio Salvador Fernández Reynoso

ASESOR



Dr. Mario Roberto Martínez Menez

ASESOR



Dr. Lenom Cajuste Bontemps

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Mayo de 2014

Agradecimientos

Es mi deseo reconocer y agradecer a distintas personas e instituciones las cuales permitieron la realización de este proyecto.

Agradezco al Colegio de Postgraduados por brindarme la oportunidad de crecer profesionalmente, y al programa de becas de posgrado que otorga el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico proporcionado durante mis estudios.

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a las personas involucradas en la asesoría y revisión de esta tesis, quienes siempre estuvieron dispuestas a colaborar y a resolver mis dudas a lo largo de su desarrollo: Dr. Demetrio Fernández Reynoso, Dr. Mario Martínez Menes, Dr. Lenom Cajuste Bontemps, Carlos Palacios Espinosa, Mtro. Erasmo Rubio Granados y Salvador Esparza Govea.

Muy especialmente agradezco a Demetrio por sus grandísimas enseñanzas, comprensión, y por siempre darme ánimos en los momentos difíciles de mi vida diaria y académica. A Carlitos por su gran apoyo en la realización de la cartografía y enseñanza de ArcGis.

A Ricardo, mi esposo, por su incondicional apoyo y comprensión.

A Lucía, mi hija, por otorgarme tanta felicidad.

A Dios, por tanta enseñanza.

Resumen

IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS DEGRADADAS, POR EROSIÓN EN CÁRCAVAS, EN EL EJE NEOVOLCÁNICO MEXICANO

Paula Erika Zamora Tirado, M. C.

Colegio de Postgraduados, 2014

El presente el trabajo se desarrolló en la provincia fisiográfica Eje Volcánico Mexicano donde los procesos de erosión por cárcavas son frecuentes y relevantes, ocasionado importantes pérdidas económicas y ambientales, con el objetivo de caracterizar los parámetros ambientales que influyen en la formación de cárcavas, como: material parental, suelo, fase física, erosionabilidad, pendiente, longitud de pendiente, orientación, curvatura horizontal y vertical, índice de posición topográfica, índice topográfico de humedad, índice de Fournier, índice de vegetación ajustada al suelo y distancia a estructuras volcánicas. Se realizó un Análisis de Componentes Principales (ACP) con el propósito de identificar las variables que mejor expliquen la formación de cárcavas. Con la superposición de las capas temáticas, se generó cartografía de áreas afectadas con cárcavas, mediante la aplicación de una clasificación supervisada por el método de máxima verosimilitud, y campos de entrenamiento de cárcavas observadas en diferentes entidades federativas del área de estudio. Se concluye que la primer componente contiene el 95.06% de la variabilidad total de los parámetros que influyen en la formación de las cárcavas. La mayor influencia, de forma directamente proporcional, corresponde a la distancia a estructuras volcánicas y fase física; seguida por la longitud de la pendiente que impacta de forma inversamente proporcional. Del estudio resulta, con un porcentaje de confiabilidad de 52.7%, el área perturbada y propensa a la formación de cárcavas es de 1'079,975 ha, siendo los Distritos de Desarrollo Rural con mayor porcentaje de problemas de erosión en cárcavas La Piedad (Michoacán de Ocampo, 15.4%), Cortázar (Guanajuato, 15.3%), y Querétaro (Querétaro, 14.1%). El procedimiento aplicado representa una herramienta útil para identificar áreas críticas para la implementación medidas de control que frenen el desarrollo y aparición de cárcavas.

Palabras clave: *análisis de componentes principales, análisis de máxima verosimilitud, erosión en cárcavas, modelación en cárcavas, variables ambientales.*

Abstract

IDENTIFICATION OF DEGRADED AREAS, BY GULLY EROSION, IN TRANS-MEXICAN VOLCANIC BELT

Paula Erika Zamora Tirado, M. C.

Colegio de Postgraduados, 2014

This work was developed in the Mexican Volcanic Belt physiographic province, where gully erosion is a common problem and causes relevant economic and environmental losses. In order to characterize the environmental parameters that influence gully's formation, it was analyzed: parent material, soil depth, soil's erosivity factor, land slope, slope length, terrain aspect, horizontal and vertical curvatures, topographic position index, moisture topographic index Fournier index, distance to volcanic structures and vegetation index. The Principal Component Analysis (PCA) was used to identify the parameter that best explain the gully's formation.

It was applied a supervised classification, by maximum likelihood method, using the mentioned environmental parameter, in order to map affected areas by gully erosion. For this classification method were used training camps of gullies observed at different stages on field. It is conclude that the first component contains 95.06 % of the total parameters variability influencing gully's formation. The biggest influence, directly proportion, belongs to distance to volcanic structures d followed by soil depth and slope length. From the mapping results, with a reliability of 52.7%, disturbed and prone gullying cover 1'079, 975 ha. The Rural Development Districts with the highest percentage of gully's erosion problem are La Piedad (Michoacán, 15.4%), Cortázar (Guanajuato, 15.3%) and Queretaro (Queretaro, 14.1%). This methodology allows identify areas where it is necessary to implement control procedures to reduce gully development and appearance.

Keywords: *principal component analysis, maximum likelihood analysis, gully, ravine modeling, environmental variables.*

Contenido

RESUMEN.....	III
ABSTRACT.....	IV
INTRODUCCIÓN.....	1
PRESENTACIÓN Y OBJETIVOS DE ESTUDIO.....	1
IMPORTANCIA.....	2
LITERATURA CITADA.....	2
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO Y ÁREA DE ESTUDIO.....	4
1. MARCO TEÓRICO.....	4
<i>Erosión en cárcavas</i>	4
(a) Concepto, tipología y clasificación de las cárcavas.....	4
(b) Origen y desarrollo de las cárcavas.....	5
(c) Factores que condicionan la formación de cárcavas.....	6
(d) Control de cárcavas.....	7
<i>La erosión en cárcavas en el Eje Neovolcánico Mexicano</i>	7
<i>Herramientas para estudiar cárcavas</i>	7
Sistema de información geográfica (SIG).....	7
Modelos digitales de elevación (MDE).....	8
Análisis de Componentes Principales (ACP).....	8
Clasificación supervisada de capas de información.....	9
Método de máxima verosimilitud o máxima probabilidad.....	10
<i>Factores topográficos</i>	10
Pendiente (θ) del terreno.....	11
Longitud de pendiente del terreno.....	11
Orientación o Aspecto (O) del terreno.....	11
Curvatura del terreno.....	12
Índice topográfico de humedad (TWI).....	13
Índice de Posición Topográfica (TPI).....	14
<i>Factores Climáticos</i>	14
Índice de Fournier (IF).....	15
<i>Factores de cobertura vegetal</i>	16
Índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI).....	16
<i>Factores edáficos</i>	17
Erodabilidad.....	18
Fase Física.....	20
<i>Factores geológicos</i>	20
Material Parental.....	20

Distancia a Volcanes.....	21
<i>Distritos de Desarrollo Rural</i>	21
2. MARCO BIOFÍSICO DEL ÁREA DE ESTUDIO	22
<i>Geografía</i>	22
<i>Geomorfología</i>	23
<i>Topografía</i>	26
<i>Suelos</i>	28
<i>Vegetación y Uso de suelo</i>	32
<i>Hidrología</i>	33
LITERATURA CITADA	33
CAPITULO II: CARACTERIZACIÓN DE VARIABLES AMBIENTALES QUE INCIDEN EN LA FORMACIÓN DE CÁRCAVAS DEL CENTRO DE MEXICO	43
<i>RESUMEN</i>	43
<i>SUMMARY</i>	44
<i>INTRODUCCIÓN</i>	45
<i>MATERIALES Y MÉTODOS</i>	46
Área de estudio	46
Obtención de la información.....	47
Análisis de la información	50
<i>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</i>	51
<i>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</i>	60
<i>LITERATURA CITADA</i>	60
CAPITULO III: DETERMINACIÓN DE ÁREAS AFECTADAS Y SUSCEPTIBLES A LA FORMACIÓN DE CÁRCAVAS: EJE NEOVOLCÁNICO MEXICANO	64
<i>RESUMEN</i>	64
<i>SUMMARY</i>	65
<i>INTRODUCCIÓN</i>	65
<i>MATERIALES Y MÉTODOS</i>	66
Área de estudio	66
Obtención de la información.....	67
Análisis de la información	71
Evaluación de resultados.....	72
<i>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</i>	73
<i>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</i>	80
<i>LITERATURA CITADA</i>	80
ANEXOS	82

Índice de cuadros

Cuadro I—1. Clasificación de cárcavas por su profundidad y área de drenaje.	5
Cuadro I—2. Clasificación del Índice de Fournier según su agresividad climática.	15
Cuadro I—3. Erosionabilidad del suelo (K) para las unidades de suelo de FAO estimada en función de la unidad de suelo y su textura ($t\ htons^{-1}\ pie^{-1}\ pulg^{-1}$).	19
Cuadro I—4. Subprovincias fisiográficas del Eje Neovolcánico Mexicano.	26
Cuadro I—5. Tipos de suelos presentes en el Eje Neovolcánico Mexicano.	29
Cuadro I—6. Uso de suelo y vegetación en el Eje Neovolcánico Mexicano.	32
Cuadro II—1. Clasificación del índice de posición topográfica.	49
Cuadro II—2. Distribución de cárcavas en función de unidad de suelo.	51
Cuadro II—3. Porcentaje de la información contenida en cada componente principal.	59
Cuadro II—4. Matriz de covarianza y correlación de la componente 1.	59
Cuadro III—1. Variables ambientales asociadas a la formación de cárcavas.	69
Cuadro III—2. Clasificación del índice de posición topográfica.	71
Cuadro III—3. Niveles de confianza de la clasificación de máxima verosimilitud.	72
Cuadro III—4. Susceptibilidad a la formación de cárcavas y superficie afectada.	73
Cuadro III—5. Porcentaje de puntos de verificación.	74
Cuadro III—6. Principales Distritos de Desarrollo Rural que pertenecen a zonas afectadas por la erosión en cárcavas, en el Eje Neovolcánico Mexicano.	78
Cuadro III—7. Distritos de Desarrollo Rural (SAGARPA), pertenecientes a zonas afectadas por la formación de cárcavas, en el Eje Neovolcánico Mexicano.	79

Índice de Figuras

Figura I—1. Localización del área de estudio.	23
Figura I—2. Mapa geológico, y de estructuras volcánicas del Eje Volcánico Mexicano.	25
Figura I—3. Mapa topográfico del Eje Volcánico Mexicano.	27
Figura I—4. Mapa Edafológico del Eje Volcánico Mexicano.	31
Figura II—1. Distribución de cárcavas por tipo de suelo.	52
Figura II—2. Distribución de cárcavas por fase física.	52
Figura II—3. Distribución de las cárcavas por tipo de roca presente.	53
Figura II—4. Distribución de las cárcavas según la pendiente del terreno.	53
Figura II—5. Distribución de las cárcavas por rangos de longitud de pendiente (m).	54
Figura II—6. Distribución de las cárcavas según la orientación de la pendiente.	54
Figura II—7. Distribución de las cárcavas según la curvatura horizontal.	55
Figura II—8. Distribución de las cárcavas según la curvatura vertical.	55
Figura II—9. Distribución de las cárcavas según su posición topográfica.	55

Figura II—10. Distribución de las cárcavas según su índice topográfico de humedad	56
Figura II—11. Distribución de las cárcavas según su distancia a volcanes (km).	56
Figura II—12. Distribución de las cárcavas por rangos del Índice de Fournier (mm).	57
Figura II—13. Distribución de las cárcavas según valores de SAVI.....	57
Figura II—14. Mapa de Índice de vegetación ajustado al suelo del Eje Volcánico Mexicano y sitios de muestreo.	58
Figura III—1. Desarrollo Metodológico.....	68
Figura III—2. Porcentaje de sistemas geológicos con presencia de cárcavas, en los sitios de verificación para un 50% de susceptibilidad.-.....	74
Figura III—3. Áreas susceptibles a la formación de cárcavas en el Eje Volcánico Mexicano.....	75
Figura III—4. Ejemplos de puntos de verificación, por clase de degradación, de la presencia de cárcavas.	77

Introducción

Presentación y objetivos de estudio

El suelo es un recurso que en gran parte no es renovable y es vital para el desarrollo económico y social. En él ocurren procesos naturales y antrópicos que influyen en sus propiedades físicas, químicas y biológicas, que pueden convertirlos en suelos frágiles y vulnerables a los fenómenos atmosféricos y a las actividades humanas (Guanca, 2010). Uno de los procesos y problemas que generalmente presentan los suelos es la erosión acelerada, provocada por la actividad humana, como efecto de un inadecuado manejo de la tierra, lo que origina la degradación de grandes zonas (Vega y Febles, 2005).

La degradación territorial, de la provincia fisiográfica Eje Volcánico Mexicano (EVM), ha ocurrido desde la época prehispánica, cuando el centro de México era altamente poblado y cultivado principalmente con maíz en suelos de origen volcánico y en periodos de lluvias asociadas a eventos ciclónicos (Bocco, 1989).

Las cárcavas son un claro ejemplo de erosión acelerada, y su presencia en un terreno, indica un estado avanzado de erosión (Anaya *et al.*, 1977). Actualmente, en el EVM estos procesos degradativos son muy frecuentes y desarrollados. Donde se manifiestan en incisiones de pocos metros de largo y escasos centímetros de profundidad, hasta varios cientos de metros de largo por varios metros de profundidad y ancho (Hernández, 1995). Este tipo de erosión se origina por el socavamiento repetido del terreno, como consecuencia de un flujo de agua concentrado (SCSA, 1982; Gray y Sortir, 1996; Poesen *et al.*, 2003). La contaminación por la movilización de sedimentos y pérdida de productividad del suelo, son los daños más representativos que ocasiona este fenómeno, lo que repercute en las actividades económicas que allí se desarrollan (Bocco, 1989).

La forma, tamaño y evolución de las cárcavas se puede relacionar con las propiedades del suelo (erodabilidad, presencia o ausencia de horizontes resistentes o contenido de humedad), factores topográficos (tamaño de la cuenca de aportación, pendiente del cauce y de las laderas), tipo de roca madre, tipo de precipitaciones (intensidad y duración), tipo de vegetación; así como la tipología del movimiento del agua superficial y subsuperficial (Moore *et al.*, 1988; Poesen y Govers, 1990).

La presente investigación se inserta en este contexto y busca caracterizar las variables ambientales que intervienen en la formación de cárcavas, así como la elaboración de un mapa de áreas afectadas o susceptibles a su formación, que ocurren en la provincia fisiográfica Eje Neovolcánico Mexicano. Para lo que se plantean los siguientes objetivos: i) describir las variables geológicas, edafológicas, climáticas, topográficas y de cobertura vegetal en las que se desarrollan las cárcavas, ii) aplicar un análisis de componentes principales, para determinar las variables ambientales que más influyen en el desarrollo de cárcavas y iii) a través de un análisis de máxima verosimilitud identificar áreas perturbadas y propensas a la formación de cárcavas.

Se pretende que la metodología, coadyuve al uso más racional de los recursos públicos, para que las dependencias gubernamentales orienten los trabajos de conservación de suelos, en aquellas áreas expuestas o propensas a este tipo de erosión.

Importancia

La gran diversidad biótica y abiótica que existe en el EVM ha permitido el establecimiento de asentamientos humanos por más de 2,500 años (Romero y Velázquez, 1999). Actualmente el 49.8% de la población de México vive en esta provincia (Gómez-Tuena *et al.*, 2005; INEGI, 2010) se cultiva el 52.47% y 47.51 de la agricultura nacional de temporal y riego respectivamente., la cual se ha establecido en asentamientos rurales o en grandes ciudades como: México, Toluca, Puebla, Tlaxcala, Pachuca, Querétaro, Morelia, Cuernavaca, Guadalajara, León, Colima, Jalapa y Morelia (Bocco, 1989).

LITERATURA CITADA

Anaya, G. M., M. Martínez, C. A. Trueba, S. B. Figueroa y M. O. Fernández. 1977. Manual de Conservación de suelos y del agua. Chapingo, Colegio de Postgraduados. México.

Bocco, G. 1989. Cartografía geomorfológica y análisis morfométrico para estudios de erosión acelerada. Estudio de caso en la Cuenca del Río Tlalpujahua, México. Boletín del Instituto de Geografía 19:39-54.

Gómez-Tuena, A., M. T. Orozco-Esquivel y L. Ferraro. 2005. Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana. Boletín de la sociedad geológica mexicana 3: 227-283.

- Gray, D. H. y R. B. Sortir. 1996. Biotechnical and soil bioengineering: Slope Stabilization, a practical guide for erosion control. John Wiley and Sons.
- Guanca, V. A. 2010. Determinación de la Erosión Hídrica de los Suelos de la Cuenca del Río Pilcomayo – Salta. Tesina. Facultad de Ciencias Naturales. Universidad Nacional de Salta.
- Hernández, G. R. 1995. Modelo geomorfométrico aplicado al estudio de la erosión en cárcavas. Revista Geográfica de América Central 31: 59-95.
- INEGI. 2010. Censo de Población y Vivienda. www.inegi.org.mx.
- Moore, I. D., G. J. Burch y D. H. Mackenzie. 1988. Topographic effects on the distribution of surface soil water and the location of ephemeral gullies. Trans. Am. Soc. Agr. Eng 31:1098-1107.
- Poesen, J. y G. Govers. 1990. Gully Erosion in the Loam Belt of Belgium: Typology and Control Measures. En Soil Erosion on Agricultural Land. J. Boardman, I. D. L. Fostery J. A. Dearing (eds.). John Wiley & Sons, Londres.
- Poesen, J., J. Nachtergaele, G. Verstraeten y C. Valentin. 2003. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. Catena 50: 91-133.
- Romero, F.J. y A. Velázquez. 1999. La región de montaña del sur de la Cuenca de México: una revisión de su importancia biológica. En: Velázquez A. y F. J. Romero (eds.). Biodiversidad de la región de montaña del sur de la Cuenca de México: bases para el ordenamiento ecológico. UAM-X-SEMARNAP.
- SCSA (Soil Conservation Society of America). 1982. Resource conservation glossary. Ankeny, IA, USA.
- Vega-Carreño, M. B. y J. M. Febles-González. 2005. La investigación de suelos erosionados: métodos e índices de diagnóstico. Minería y Geología 21: 1-18.

Capítulo I. MARCO TEÓRICO Y ÁREA DE ESTUDIO

1. Marco Teórico

Erosión en cárcavas

La erosión en cárcavas es uno de los procesos erosivos más severos, ya que no solamente reduce las áreas agrícolas, de pastoreo y forestales, sino que también disminuye la calidad del paisaje y el valor de los terrenos. La formación de cárcavas es la principal causa de la sedimentación de los cuerpos de agua, lo que daña la infraestructura ubicada aguas abajo y aumenta los riesgos por inundación (Valentín *et al.*, 2005; Gómez *et al.*, 2011).

(a) Concepto, tipología y clasificación de las cárcavas

Las cárcavas se definen como canales, más o menos profundos, originados por el socavamiento repetido del terreno por flujos de agua concentrados. Generalmente estos canales solo llevan agua durante e inmediatamente después de fuertes precipitaciones (SCSA, 1982; Gray y Sortir, 1996; Poesen *et al.*, 2003; Osterkamp, 2008). Acordando a Iroume *et al.* (1994) y Rivera (1998), la presencia de cárcavas indica un estado avanzado de degradación; ya que generalmente se inician después de la pérdida superficial de suelo. Esta erosión superficial (en su momento, causada por el impacto de las gotas de lluvia, la destrucción de los agregados naturales del suelo, la erosión laminar y en surcos) obedece a la concentración de escurrimientos; por el uso inadecuado de los suelos y a la falta de prácticas de conservación. La erosión en cárcavas aparece en diversos climas, principalmente en semiáridos y, en menor porcentaje, en regiones húmedas y subhúmedas (Regües *et al.*, 1995; Torri y Rodolfi, 2000). También, estas aparecen en áreas con suelos profundos y frágiles (López y Palacio, 1995).

La erosión en cárcavas se ha clasificado en efímera y permanente (Casalí *et al.*, 1999; Nachtergaele y Poesen, 1999; Gómez *et al.*, 2011). Las cárcavas efímeras están asociadas a terrenos agrícolas y pueden ser eliminadas con herramientas de laboreo. Siempre aparecen en el mismo lugar y su desarrollo generalmente es dendrítico, aleatorio y con profundidades mínimas de 0.5 m (Casalí *et al.*, 1999; SCSA, 2001; Gómez *et al.*, 2011). A diferencia de las cárcavas efímeras, las cárcavas permanentes no pueden ser eliminadas con el uso de procedimientos convencionales de laboreo (Gómez *et al.*, 2011). Estas cárcavas son canales de erosión que su cabecera puede tener una profundidad de 0.8 m (Vanwalleghem *et al.*,

2005), alcanzar cientos de metros de longitud y pueden desarrollarse en forma continua o discontinua. (Gómez *et al.*, 2011).

Las cárcavas pueden clasificarse, de acuerdo a diversos criterios, en base a: morfología de cabecera y sección, estructura de la red de drenaje, génesis y morfología, posición topográfica, entre otros (Gómez *et al.*, 2011). Peralta (1977) clasifica las cárcavas por su profundidad y área de drenaje (Cuadro I—1). Por su forma se clasifican en: lineales, bulbosas, dendríticas, enrejadas, paralelas y compuestas.

Cuadro I—1. Clasificación de cárcavas por su profundidad y área de drenaje.

Tamaño	Profundidad (m)	Área de drenaje (ha)
Pequeña	< 1	< 2
Mediana	1 – 4.5	2 - 20
Grande	> 4.5	> 20

(b) Origen y desarrollo de las cárcavas

Las cárcavas generalmente se asocian a una erosión acelerada, por lo tanto a paisajes inestables (Morgan, 1997). La erosión en cárcavas se origina por la acción del flujo superficial, de tipo concentrado, y el flujo subsuperficial. Las cárcavas formadas por la circulación de un flujo concentrado se producen como resultado de una disminución de la adherencia, fuerza que mantiene unidas las partículas del suelo, y por un aumento de la fuerza erosiva del flujo (Hutchinson y Pritchard, 1976). Este balance de fuerzas está relacionado con la superación de un umbral, de tipo geomorfológico, por un componente climático, antrópico o del propio sistema de la cárcava (Gómez *et al.*, 2011).

Las cárcavas originadas por un flujo superficial se relacionan a un incremento de la escorrentía, por cambios en la conducción y/o regulación, producto de cambios en el uso de suelo, eventos de precipitación de carácter extremo, modificaciones antrópicas en el drenaje (Rivera, 1998). Con el tiempo las depresiones ocasionadas por la erosión superficial, en terrenos con incendios o sobrepastoreo, se interconectan produciendo un flujo concentrado superficial que favorece la aparición de cárcavas (Gómez *et al.*, 2011).

Las cárcavas que se originan por la acción de un flujo a nivel subsuperficial, como consecuencia de la circulación de agua de percolación a través del perfil de suelo, dan lugar

a formas tubulares de erosión (Faulkner, 2006; Desir y Marín, 2007; Echeverría *et al.*, 2007). Este tipo de erosión se relaciona con suelos de baja permeabilidad (arcillosos o limosos) y alta capacidad de infiltración, a elevados gradientes hidráulicos y a la presencia de iones solubles (principalmente sodio).

Por otro lado, en algunas ocasiones las cicatrices superficiales en los terrenos originadas de forma natural (deslizamientos de tierra), o factores antrópicos (cunetas de caminos y carreteras o las actividades de construcción en ambientes urbanos), son causas que favorecen la aparición de cárcavas (Gómez *et al.*, 2011).

Las cárcavas se desarrollan por el crecimiento de su cabecera aguas arriba (erosión remontante), por el crecimiento lateral en los taludes de su cauce y por la profundización del mismo (Valcarcel, 1989; Gómez *et al.*, 2011); este desarrollo continua hasta que la cárcava alcanza un nuevo estado de equilibrio. Cuando las cárcavas evolucionan, por efecto de algún control en profundidad, con crecimiento aguas arriba y hacia los lados de la ladera, se denominan cárcavas remotantes (Rivera, 1998).

Durante el desarrollo de una cárcava existe la posibilidad de que el canal alcance un punto de equilibrio en su crecimiento y posteriormente se produzca una fase de agradación. El equilibrio puede alcanzarse por la disminución de la escorrentía causada por la disminución del área de drenaje, la revegetación del cauce, o una estructura de control (Graf, 1997; Nachtergaele *et al.* 2002). Pero también existe la posibilidad de que no se alcancen las condiciones de equilibrio y el acarcavamiento inicial se convierta en primer lugar en una red de drenaje acarcavada y en última instancia en un paisaje de *badlands* (Gómez *et al.*, 2011).

(c) Factores que condicionan la formación de cárcavas

La ocurrencia, intensidad y evolución de las cárcavas es resultado de la interacción de una gran variedad de factores geológicos, climáticos, edáficos, hidrológicos y de manejo de terreno, tales como: propiedades del suelo, tipo de material parental, uso y manejo de la cubierta vegetal, fluctuaciones climáticas y alteraciones topográficas (Valcarcel, 1989; Poesen *et al.*, 2003).

(d) Control de cárcavas

Los tratamientos para controlar la formación de cárcavas son variables y dependen de los recursos disponibles y de las características de cada zona. Los tratamientos más usados son: presas de control de azolves, estructuras de cabeceo, desviación de escurrimientos, recubrimiento de cauces (vegetación y materiales pétreos) y reforzamiento de los puntos de caída de agua (Fuentes y Martínez, 2001). En forma complementaria también se controlan reduciendo la labranza y estableciendo prácticas de retención de suelo como las barreras vivas en contorno (Zepeda, 2008). El control exitoso es variable, algunos autores reportan una disminución en la producción de sedimentos, mientras que otros consideran que es difícil lograr el objetivo. La falta de éxito obedece, principalmente, a una identificación incorrecta del agente causante; ya que la solución es diferente para problemas causados por flujos superficiales, subsuperficiales o ambos (Rivera, 1998; Gómez *et al.*, 2011).

La erosión en cárcavas en el Eje Neovolcánico Mexicano

En el EVM existen algunos estudios sobre erosión por cárcavas que mantienen un enfoque de diagnóstico. Mediante el uso de fotointerpretación, sistemas de información geográfica y técnicas de percepción remota, Bocco (1989; 1990; *et al.*, 1991) generó unidades geomorfométricas para la elaboración de inventarios de erosión acelerada. Así mismo, desarrolló modelos sobre la dinámica de cárcavas en zonas de vulcanismo cuaternario. Palacio (1990), por medio de un sistema de información geográfica, caracterizó la erosión en cárcavas en un municipio del estado de Hidalgo, considerando la litología, tipo de suelo, pendiente y cubierta del terreno. Por otro lado, López y Palacio (1995) en el Municipio de Huasca de Ocampo, Hidalgo, cuantificaron algunos parámetros en cabeceras de cárcavas, a través del uso de videografía y sistemas de información geográfica.

Herramientas para estudiar cárcavas

Sistema de información geográfica (SIG)

Los Sistemas de Información Geográfica, pueden definirse como un conjunto de técnicas y procedimientos digitales, que permiten la obtención, almacenamiento, manipulación y análisis de información geográficamente referenciada (Poole, 1995). Actualmente son de gran utilidad en estudios sobre medio ambiente, recursos naturales y planificación

territorial, ya que proporcionan herramientas que permiten la vinculación, en estudios de análisis espacial, de diferentes variables del territorio (Pacheco, 2012). La cantidad de información necesaria, para realizar un mapa de áreas afectadas por cárcavas, hace que la cartografía convencional resulte insuficiente. Así, los SIG permiten usar varios métodos para analizar, en tiempo razonable, los factores que intervienen en los procesos de erosión en cárcavas, así como la representación cartográfica de las mismas.

Modelos digitales de elevación (MDE)

Los modelos digitales de elevación se definen como un conjunto de datos altimétricos, que representan en forma digital la superficie terrestre y que frecuentemente se usan en los SIG (Revollo, 2001; Grohmann, 2005). Su uso se relaciona a bases de datos para el análisis visual y matemático de la topografía del paisaje, de las formas de la tierra y para modelar el relieve (Moore *et al.*, 1991; Martínez-Casasnovas *et al.*, 2004). Dentro de sus aplicaciones esta la construcción de parámetros para modelos de erosión y simulación hidrológica (Moore *et al.*, 1991). Los MDE son una herramienta muy importante en la obtención de variables que pueden afectar el desarrollo de cárcavas, tales como: pendiente, curvatura del terreno, orientación, área de drenaje, etc.

Análisis de Componentes Principales (ACP)

El Análisis de Componentes Principales (ACP) es una técnica multivariada, que se aplica ampliamente en los ámbitos de las ciencias sociales y ambientales para el manejo de un conjunto de datos que representan y explican el comportamiento de un gran número de unidades de observación. El ACP es un procedimiento estadístico de síntesis de la información, o reducción de la dimensión (número de variables), que se conoce como componentes principales, cuyo objetivo es explicar la mayor parte de la varianza contenida en los datos originales. (Baró, 2000). Los nuevos componentes principales son combinaciones lineales de las variables originales, y además serán independientes entre sí (Johnson, 2000).

Clasificación supervisada de capas de información

La clasificación supervisada es una técnica de procesamiento digital que funciona a través de algoritmos basados en cálculos estadísticos (Rodríguez, 2004). Esta técnica usa las diferentes capas de información, correspondientes a los factores que influyen en la formación de cárcavas. De estas capas se obtiene, a través del SIG, las estadísticas de entrenamiento, para grupos de píxeles que representan los objetos del mundo real; en esta investigación corresponden a las cárcavas visitadas en campo (Lillesand, 2007; Pacheco, 2012).

Este método permite explorar, sobre el conjunto de capas de información, una o varias clases, por medio del análisis estadístico multivariado, de cada posición y reclasificarla de acuerdo a las probabilidades de cada clase.

De acuerdo con Rodríguez (2004) y Montesinos (2002) los pasos para realizar la clasificación supervisada se pueden resumir en:

1. Decidir el número de clases o grupos en los cuales se desea clasificar las capas de información; en este estudio fue un solo tipo de cárcava.
2. Seleccionar un área que represente a cada una de las clases deseadas. Los píxeles correspondientes a estas áreas son usados como píxeles de entrenamiento y partir de ellos se obtienen las estadísticas de entrenamiento. En este caso los píxeles de entrenamiento se definieron en visitas de campo y se capturaron en Google Earth Image (©2005 Digital Globe).
3. Usar los datos de entrenamiento para estimar los parámetros particulares correspondientes al método de clasificación a utilizar; en este estudio se usó el de máxima probabilidad.
4. Usar las estadísticas de entrenamiento, estimadas anteriormente, para clasificar cada uno de los píxeles dentro del conjunto de capas de información, y número de clases definidas en el paso 1.
5. Producir una imagen temática donde se muestre claramente los resultados de la clasificación.

Método de máxima verosimilitud o máxima probabilidad

El clasificador de máxima verosimilitud es un método de clasificación supervisada que consiste en clasificar cada píxel dentro de la zona a la cual tiene mayor probabilidad de pertenecer basado en sus valores (Rodríguez, 2004).

Este método se engloba dentro de los denominados clasificadores cuadráticos y asume que los datos siguen una función de distribución normal para asignar la probabilidad de que un píxel cualquiera pertenezca a cada una de las clases definidas. El píxel se asigna de este modo a la clase que es más probable que pertenezca. Esto permite describir esa categoría por una función de probabilidad, a partir de su vector de medias y matriz de varianza covarianza. Para determinar a qué clase pertenece un determinado píxel, se calcula la probabilidad de pertenencia a todas las clases y se asignará a la clase con la máxima probabilidad (Quirós, 2009). Con este método se han realizado estudios medioambientales en los que se ha identificado, cartografiado y analizado la dinámica espacial y temporal de los ecosistemas (Pacheco, 2012).

Factores topográficos

La topografía determina el área vertiente hacia un punto y por tanto la cantidad de agua que concentra cada zona dentro de una cuenca. El relieve del terreno influye en la pendiente, longitud, y forma de los cauces y laderas. Frecuentemente el grado de la pendiente origina problemas más agudos que la longitud de la pendiente. En cuanto a la longitud de la pendiente, el efecto es variable de acuerdo a la naturaleza de la precipitación, a la cobertura vegetal y a la textura del suelo; una mayor longitud de la pendiente aumenta el espesor de la lámina de escurrimiento o carga hidráulica (Guanca, 2010). El efecto conjunto del área de drenaje, como indicador del caudal, y de la pendiente, ha llevado al análisis de la iniciación y desarrollo de cárcavas como un fenómeno de umbral topográfico (Patton y Schumm, 1975).

La topografía influye enormemente sobre las diversas variables que intervienen en la dinámica y formación del suelo, en la vegetación, en la erosión (Cartaya *et al.*, 2006), en el transporte de agua (superficial y subsuperficial) y en la producción de sedimentos (Olaya, 2009).

Pendiente (θ) del terreno

La pendiente es una variable que representa el grado de cambio de la elevación, entre dos puntos del terreno, en relación a la distancia que los separa (Bosque Sendra, 1997). Los resultados pueden ser obtenidos en porcentaje o en grados (Chacón *et al.*, 1993). Esta puede conocerse considerando su ángulo, longitud y curvatura (Buitrago, 2011).

La pendiente es una variable que interviene en los principales procesos que ocurren en la superficie terrestre, tales como: erosión, transporte de agua y sedimentos. Es un factor que controla la hidrología de las cuencas y los movimientos en masa (Bocco *et al.*, 1991). De acuerdo con Suet y Liam (2004) la pendiente influye sobre la velocidad del flujo superficial y subsuperficial, la tasa de escorrentía y el contenido de humedad del suelo. De acuerdo con Milevski *et al.*, (2007) cuando la pendiente y la longitud de la pendiente aumentan, debido a una mayor capacidad de transporte, se incrementa la susceptibilidad a la erosión.

Longitud de pendiente del terreno

Entre mayor sea la longitud de la pendiente, la erosión del suelo incrementará debido a un aumento de la energía cinética, a lo largo de la ladera, de la escorrentía que se va acumulando. Por lo tanto, las pendientes largas llevan a una intensificación de la escorrentía, aumentando su volumen y causando de esta forma una mayor erosión (FAO, 2000).

Orientación o Aspecto (O) del terreno

La orientación o aspecto del terreno puede definirse como la dirección horizontal de la pendiente que enfrenta la ladera de una montaña. El aspecto afecta la insolación, es decir, la concentración de los rayos del sol, por unidad de superficie, que entran en contacto con el suelo, afectando el clima local (microclima). Hidrológicamente indica la dirección del flujo, respecto al norte, y determina la evapotranspiración y el tipo de cobertura vegetal. Pedológicamente determina el desarrollo del suelo y el contenido de materia orgánica del mismo. Los suelos con un aspecto predominante de barlovento serán típicamente más superficiales, a menudo, con las características del subsuelo más desarrolladas, que los suelos adyacentes en el sotavento, donde los vientos de desaceleración tienden a depositar

más partículas, transmitidas por el aire, en suspensión. Esta situación es importante en las regiones con depósitos eólicos de cenizas volcánicas donde las partículas de vientos cargados a menudo soplan en una dirección predominante (Abarca, 2010; Leiva, 2012).

Curvatura del terreno

La curvatura representa la tasa de cambio de la pendiente en el espacio, (Domínguez, 2003). Esta variable es un indicador de la concavidad y convexidad del terreno, que determina la convergencia o acumulación de flujos de agua, e influye en la distribución del contenido de humedad (Moore *et. al.* 1988). La concavidad y la convexidad se asocian a la acumulación de flujo y a la dispersión del mismo, respectivamente. Las dos direcciones en las que la curvatura del terreno tienen una significancia, en aplicaciones geomorfológicas e hidrológicas, son: la dirección de la máxima pendiente (curvatura de perfil o vertical) y la dirección perpendicular a la máxima pendiente (curvatura plana u horizontal) (Pacheco, 2012). La aplicación de mapas de curvatura se ha utilizado en la predicción de la existencia de cárcavas en terrenos agrícolas (Martínez-Casasnova, 1998).

Curvatura Plana u Horizontal (Ch)

La curvatura horizontal depende del aspecto y de la pendiente del terreno; es una curvatura que va en dirección perpendicular a la máxima pendiente y está relacionada con la divergencia (convexa) y convergencia (cóncava) de flujos, por lo tanto es un indicador de la concentración de agua en el suelo y de textura, estructura, fertilidad y materia orgánica (Jordan, 2008; Kennelly, 2008; Abarca, 2010). En la salida del plano, un valor positivo indica que la superficie, en esa celda, es convexa hacia arriba. Un plano negativo indica que la superficie, en esa celda, es cóncava hacia arriba. Un valor 0 indica que la superficie es plana.

Curvatura de Perfil o Vertical (Cv)

La curvatura vertical (Cv) es una medida de la desaceleración y aceleración relativa del flujo. La curvatura vertical refleja la concavidad o convexidad del terreno en la dirección de la máxima pendiente; está relacionada con los cambios del ángulo de la pendiente que

afecta la aceleración o deceleración del flujo, e influencia los procesos de transporte y deposición de las partículas del suelo. En la salida del perfil, un valor negativo indica que la superficie, en esa celda, es convexa hacia arriba. Un perfil positivo indica que la superficie, en esa celda, es cóncava hacia arriba. Un valor 0 indica que la superficie es plana. Una curvatura convexa ($C_v > 0$) indica aceleración local de flujo, por lo que presentan mayor potencial a procesos de erosión, y una cóncava ($C_v < 0$) disminuye o frena el flujo facilitando la infiltración e indicando mayor capacidad para la deposición (Buitrago, 2011; Ortiz, 2012; Pacheco, 2012).

Índice topográfico de humedad (TWI)

Este índice define los sitios donde hay una mayor tendencia a acumular agua (Abarca, 2010; Buitrago, 2011). Es una función del área de aportación (dirección y acumulación de flujo) que se representan por el área de captación o área de acumulación de flujo y se relacionan con la pendiente del terreno, para un punto específico (pixel); que describe el caudal de agua que eventualmente convergerá en ese punto (Milevski *et al.*, 2007). Su uso se relaciona con la humedad del suelo y refleja la tendencia de éste a generar escorrentía. Así, cuanto más elevado sea el TWI, en función de su configuración topográfica, mayor humedad debe presentar la celda (Castro *et al.*, 2012). Entre mayor sea el área de captación el gradiente será menor, y el índice de humedad y el contenido de humedad del suelo disminuirán. Este índice controla las acumulaciones de flujo, la humedad del suelo, la profundidad de la lámina de agua, evapotranspiración, profundidad del suelo, materia orgánica, contenido de limos y arenas y distribución de cobertura vegetal (Kienzle, 2004). Este índice se calcula según:

$$TWI_i = \ln \left[\frac{As_i}{\tan \beta_i} \right]$$

Dónde:

As_i es el área de drenaje (área de acumulación de flujo en la celda i) y β_i es la pendiente del terreno en grados (pendiente local en la celda i).

Índice de Posición Topográfica (TPI)

El TPI es considerado un índice topográfico compuesto (Moore *et al.*, 1991), basado en datos de elevación, para caracterizar la topografía local (geoformas) con relación a su contexto espacial o posición relativa del terreno. Diversos procesos físicos asociados con el tipo de especies vegetales, propiedades edáficas, tipos de suelos presentes, patrones de drenaje y de conectividad hidrológica están correlacionados con la posición topográfica. La importancia de este índice se basa en la clasificación de geoformas, basada en la morfología y en la posición relativa del terreno (Coops *et al.*, 1998).

Zimmermann (2000) calculó la posición topográfica, y el método tiene un enfoque jerarquizado, que utiliza ventanas de 3x3 para calcular la diferencia entre la elevación media de las celdas, que rodean la celda central, y la elevación de esta celda. Una integración jerárquica, en un solo mapa, permite apreciar las diferentes posiciones topográficas. La posición topográfica es dependiente de la escala, ya que el mismo punto, en la cresta de una montaña puede considerarse como pico o área plana dependiendo de la escala de análisis. La escala es determinada entonces por la vecindad usada en el análisis.

Weiss (2001) propuso un índice de posición topográfica para la clasificación de geoformas basado en el mismo principio de Zimmermann. Valores positivos significan que la celda es más alta que sus vecinos, mientras que valores negativos indican que es más baja. El grado en que sea más alta o más baja, además de la pendiente de la celda, permiten clasificar la celda en una posición determinada. Si es significativamente mayor, que las celdas vecinas que la rodean, entonces es probable estar en o cerca de la cima de una colina o cresta. Valores bajos sugieren que la celda está en o cerca del fondo de un valle; valores cercanos a cero podrían significar un área llana o una zona de media ladera, por lo que la pendiente se puede utilizar para distinguir la posición o la categoría de la geoforma. Los algoritmos utilizan vecindades circulares, donde solamente celdas dentro de una determinada distancia son consideradas. Su utilidad radica en poder distinguir las colinas en las zonas de pendientes rectilíneas, las crestas de colinas y los valles de depresiones locales, así como identificar el aspecto general de las formas terrestres.

Factores Climáticos

Los factores climáticos tienen un papel muy importante en este tipo de erosión, siendo las precipitaciones determinantes para el establecimiento de la cobertura vegetal; tanto por

exceso, motivando el desarrollo de una cobertura vegetal densa, como por deficiencias, ocasionando una cobertura pobre. Por otro lado, el volumen y caudal de la escorrentía dependen de la intensidad, la duración y la frecuencia de la lluvia. De estos factores, la intensidad es el más importante y las pérdidas por la erosión aumentan con las intensidades más altas de las lluvias (FAO, 2000). La intensidad los eventos extremos de la lluvia y su distribución a lo largo del año son determinantes en la aparición y desarrollo de cárcavas, tanto efímeras como permanentes (Poesen *et al.*, 1996; Poesen y Hooke, 1997).

Índice de Fournier (IF)

Ante la falta de datos de intensidad de lluvia y su energía cinética, varios autores han creado indicadores para relacionar las características de la precipitación con su agresividad (Laval, 2009). En este sentido, el Índice de Fournier es un indicador de agresividad de la lluvia que ha mostrado alta correlación con la cantidad de sedimentos arrastrados por la escorrentía (Olivares, 2009). Este índice se obtiene con las láminas de precipitación registradas en estaciones meteorológicas con datos representativos de la zona de estudio (Pizarro *et al.*, 2008). El IF se calcula utilizando como base la precipitación media anual y la precipitación del mes más lluvioso; según la siguiente ecuación:

$$IF = \frac{P_{max}^2}{P_m}$$

Dónde:

IF es el índice de Fournier medio anual (mm), P_{max} es la precipitación media del mes más lluvioso (mm) y P_m es la precipitación media anual (mm).

En el Cuadro I—2 se muestran valores de IF en función de la agresividad de la lluvia (Olivares, 2009).

Cuadro I—2. Clasificación del Índice de Fournier según su agresividad climática.

Clase	IF (mm)	Agresividad
1	<50	Muy Bajo
2	50 – 100	Bajo
3	100 – 150	Moderado
4	150 – 200	Alto
5	>200	Muy Alto

Factores de cobertura vegetal

La vegetación es un factor que determina el comportamiento hidrológico del terreno, es decir, su efecto se relaciona con la interceptación, velocidad de escurrimiento e infiltración. Cuando en el cauce de una cárcava existe una cubierta vegetal, esta proporciona una estabilidad sobre las márgenes y minimiza la velocidad de escurrimiento, por el contrario, cuando el terreno o canal carece de esta cubierta los valores de pérdida de suelos son importantes (Guanca, 2010). La influencia que tiene la vegetación sobre la erosión, depende de la época del año, tipo de cultivo, grado de cobertura y desarrollo de raíces. Según Gómez *et al.* (2011) la erosión en los taludes de la cárcava depende del tipo, estacionalidad, densidad, morfología, edad y salud de la vegetación presente.

Los procesos erosivos se ven favorecidos o muestran resistencia a su desarrollo, dependiendo del tipo, densidad y área foliar (Domínguez, 2003). Con el propósito de tener mayor información sobre la densidad de la cubierta vegetal han sido desarrollados diversos índices de vegetación utilizando datos espectrales de los sensores remotos satelitales (Carvacho y Sánchez, 2010). Los índices de vegetación son calculados a partir de los valores de la reflectancia, a distintas longitudes de onda, que pretenden inferir información relacionada con la vegetación, minimizando la influencia de las perturbaciones asociadas al suelo y las condiciones atmosféricas. Estos índices usan básicamente los valores de reflectancia en las zonas espectrales del rojo (RED) e infrarrojo cercano (NIR). La banda roja correlacionada con la clorofila y la infrarroja con el contenido de humedad en el parénquima de las hojas. Esta última, correlacionada con el índice de área foliar y la densidad de vegetación verde (Gilabert *et al.*, 1997). Los índices de vegetación tienden a medir la biomasa y vigor vegetal, así, los valores más altos del índice se relacionan con celdas cubiertas con vegetación saludable (Campbell, 2007).

Índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI)

El Índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) es un índice de vegetación que intenta minimizar las influencias del brillo del suelo a través de un factor de corrección. Este índice se calcula a partir de:

$$SAVI = \left(\frac{NIR - RED}{NIR + Red + L} \right) (1 + L)$$

Dónde:

NIR y RED se refiere a las bandas asociadas con aquellas longitudes de onda. El valor L varía dependiendo de la cantidad de cubierta vegetal en estado verde. Generalmente, en áreas sin cubierta vegetal verde, $L=1$; en áreas de cubierta de vegetación verde moderada, $L=0.5$ (funciona bien en la mayoría de las situaciones y es el valor utilizado por default); y en áreas con cubierta de vegetación muy alta, $L=0$ (el cual es equivalente al método NDVI). Los valores de SAVI fluctúan entre -1.0 y 1.0 (Huete, 1988).

Factores edáficos

De acuerdo a Bull y Kirkby (1997) las propiedades físicas y químicas del suelo influyen en la distribución espacial y en la densidad de desarrollo de las cárcavas. Entre las propiedades físicas sobresalen la erodabilidad y la resistencia al esfuerzo cortante; variables que determinan el grado de erosión que puede causar el flujo concentrado (Knapen *et al.*, 2007). Ambas variables están controladas por la textura, principalmente los fragmentos de roca superficial; la compactación, afectada por el uso y manejo del suelo (Arulanandan *et al.*, 1975 citado por Gómez *et al.*, 2011; Poesen *et al.*, 1999); y la capacidad de infiltración, que condiciona el escurrimiento superficial. Así, los suelos de texturas finas generalmente son más resistentes a la desagregación, pero sus sedimentos son fácilmente transportables; son impermeables y constituyen unidades de suelos donde el agua no penetra sino escurre por la superficie. Por el contrario, los suelos de textura gruesa son desagregados fácilmente, sus sedimentos presentan menores desplazamientos y son permeables. Las texturas más adecuadas contra los efectos erosivos son las medias, porque permiten ejercer un mayor control en la infiltración, por lo tanto tienen menores probabilidades de presentar escorrentía superficial y erosión hídrica (Wischmeier y Mannering, 1969; Pacheco, 2012).

De acuerdo con Poesen *et al.* (2003), la distribución vertical de diferentes capas u horizontes influye en el tamaño de la cárcava, su profundidad y la morfología de la sección. Por ejemplo, la presencia de un horizonte argílico, de acumulación de arcillas del tipo Bt, puede ejercer un control en el desarrollo de la cárcava, impidiendo su profundización en el perfil de suelo. Los horizontes del tipo fragipans, horizontes petrocálcicos o sustratos de roca madre no erosionable, limitan los procesos de acarcavamiento. La presencia de horizontes subyacentes de baja permeabilidad puede favorecer el desarrollo de procesos de acarcavamiento induciendo una presión positiva del agua, en los poros de los horizontes

superiores, y disminuyendo la resistencia a la erosión de estos horizontes superficiales (Gómez *et al.*, 2011).

Por otro lado, la composición química del fluido puede crear modificaciones en las características de agregación del suelo. En las arcillas, incrementos del Na disuelto, en relación con otros cationes básicos del agua en los poros, puede ayudar a disgregar las partículas de suelo (Gómez *et al.*, 2011).

Erodabilidad

La erodabilidad del suelo (factor K), es la resistencia que ofrecen las partículas del suelo para ser disgregadas (Morgan, 2005). Representa la susceptibilidad del suelo a erosionarse y la capacidad de infiltración del mismo, la cual condiciona su respuesta al escurrimiento superficial (Clérici y García, 2001). Su magnitud depende de la textura, el contenido de materia orgánica, la estructura y la permeabilidad del suelo (Wischmeier y Smith, 1978). Un Factor-K bajo (alrededor de 0.05 a 0.2) indica una resistencia alta a la erosividad y un Factor-K alto ($K > 0.4$) indica un suelo muy erosivo. En el Cuadro I—3 se presentan los valores de Erodabilidad del suelo (Factor K) en función de la unidad de suelo y su textura (Figuerola, 1991; Burke y Sugg, 2006).

Cuadro I—3. Erosionabilidad del suelo (K) para las unidades de suelo de FAO estimada en función de la unidad de suelo y su textura (t htons⁻¹ pie⁻¹ pulg⁻¹).

Orden	Textura			Orden	Textura		
	Gruesa	Media	Fina		Gruesa	Media	Fina
Acrisoles	0.182	0.280	0.091	Luvisoles órticos	0.026	0.280	0.091
Acrisoles férricos	0.091	0.140	0.049	Luvisoles plínticos	0.371	0.553	0.182
Acrisoles gleicos	0.182	0.280	0.091	Luvisoles vérticos	0.371	0.553	0.182
Acrisoles húmicos	0.091	0.140	0.049	Greyzems (a, gleícos)	0.182	0.280	0.091
Acrisoles órticos	0.182	0.280	0.091	Nitsoles (dístricos, eútricos, húmicos)	0.091	0.140	0.049
Acrisoles plínticos	0.371	0.553	0.182	Histosoles (dístricos, eútricos, gélicos)	0.091	0.140	0.049
Cambisoles	0.182	0.280	0.091	Podzoles	0.371	0.553	0.182
Cambisoles crómicos	0.182	0.280	0.091	Podzoles férricos	0.371	0.553	0.182
Cambisoles dístricos	0.182	0.280	0.091	Podzoles gleicos	0.371	0.553	0.182
Cambisoles eútricos	0.182	0.280	0.091	Podzoles húmicos	0.182	0.280	0.091
Cambisoles férricos	0.091	0.140	0.049	Podzoles lépticos	0.182	0.280	0.091
Cambisoles gleicos	0.182	0.280	0.091	Podzoles órticos	0.371	0.553	0.182
Cambisoles húmicos	0.091	0.140	0.049	Podzoles plácicos	0.371	0.553	0.182
Cambisoles cálcicos	0.182	0.280	0.091	Arenosoles (álb., cámb., férr., lúv.)	0.091	0.140	0.049
Cambisoles vérticos	0.371	0.553	0.182	Regosoles	0.182	0.280	0.091
Cambisoles gélicos	0.371	0.553	0.182	Regosoles eútricos	0.182	0.280	0.091
Chernozems (glósicos,	0.091	0.140	0.049	Regosoles calcáreos	0.091	0.140	0.049
Podzoluvisoles (dístr.,	0.371	0.553	0.182	Regosoles dístricos	0.182	0.280	0.091
Rendzinas	0.091	0.140	0.049	Regosoles gélicos	0.371	0.553	0.182
Ferrazoles (ácri., húm., órt.,	0.091	0.140	0.049	Solonetz	0.371	0.553	0.182
Gleysoles	0.182	0.280	0.091	Solonetz gleico	0.371	0.553	0.182
Gleysoles calcáricos	0.091	0.140	0.049	Solonetz móllico	0.182	0.280	0.091
Gleysoles dístricos	0.182	0.280	0.091	Solonetz órtico	0.371	0.553	0.182
Gleysoles eútricos	0.182	0.280	0.091	Andosoles	0.182	0.280	0.091
Gleysoles húmicos	0.091	0.140	0.049	Andosoles húmicos	0.091	0.140	0.049
Gleysoles móllicos	0.091	0.140	0.049	Andosoles móllicos	0.091	0.140	0.049
Gleysoles plínticos	0.371	0.553	0.182	Andosoles ócricos	0.182	0.280	0.091
Gleysoles gélicos	0.371	0.553	0.182	Andosoles vétricos	0.182	0.280	0.091
Gleysoles vérticos	0.371	0.553	0.182	Rankers	0.091	0.140	0.049
Phaeozems (calc., gleíc.,	0.091	0.140	0.049	Vertisoles (crómicos, péllicos)	0.371	0.553	0.182
Litsoles	0.091	0.140	0.049	Planosoles	0.371	0.553	0.182
Fluvisoles	0.182	0.280	0.091	Planosoles dístricos	0.371	0.553	0.182
Fluvisoles calcáricos	0.091	0.140	0.049	Planosoles eútricos	0.371	0.553	0.182
Fluvisoles dístrico	0.182	0.280	0.091	Planosoles húmicos	0.182	0.280	0.091
Fluvisoles eútricos	0.182	0.280	0.091	Planosoles móllicos	0.182	0.280	0.091
Fluvisoles tiónicos	0.371	0.553	0.182	Planosoles solódicos	0.371	0.553	0.182
Fluvisoles gleicos	0.371	0.553	0.182	Planosoles gélicos	0.371	0.553	0.182
Kastanozems (háplicos,	0.182	0.280	0.091	Xerosoles (hápl., cálc., lúv., gípsi.)	0.371	0.553	0.182
Luvisoles	0.182	0.280	0.091	Yermosoles (hápl., cálc., lúv., gípsi., taq.)	0.371	0.553	0.182
Luvisoles álbicos	0.371	0.553	0.182	Solonchaks	0.182	0.280	0.091
Luvisoles crómicos	0.182	0.280	0.091	Solonchaks gleicos	0.182	0.280	0.091
Luvisoles férricos	0.091	0.140	0.049	Solonchaks móllicos	0.091	0.140	0.049
Luvisoles gleicos	0.182	0.280	0.091	Solonchaks órticos	0.182	0.280	0.091
Luvisoles cálcicos	0.182	0.280	0.091	Solonchaks takiricos	0.371	0.553	0.182

Fase Física

Se refiere a la distribución vertical de diferentes capas u horizontes que controlan en gran medida el tamaño de la cárcava y más específicamente la profundidad y morfología de su sección hidráulica (Ireland *et al.*, 1939; Poesen *et al.*, 2003).

La fase física señala la presencia de fragmentos de roca y materiales cementados, que impiden o limitan el uso agrícola del suelo y el empleo de maquinaria agrícola (INEGI, 2004). Esta fase se divide en fases superficiales y de profundidad, las cuales pueden ser un indicador, en estudios de áreas extensas, de la profundidad de un suelo. Una fase profunda se refiere a capas duras, limitantes del crecimiento radicular, que se encuentran a profundidades entre 50 y 100 cm; es decir, que no limitan la capacidad del suelo para las actividades agrícolas. Se llaman someras cuando el control radicular se encuentra a menos de 50 cm de profundidad.

Entre las principales fases físicas se tienen la lítica, la petrocálcica, la petrogypsica y la dúrica. La fase lítica se caracteriza por una capa de roca dura y continua o de un conjunto de trozos de roca muy abundantes que impiden la penetración de las raíces. La fase petrocálcica indica la presencia de una capa cementada y endurecida por carbonatos (caliche). La fase petrogypsica muestra una capa endurecida rica en yeso. Por último, la fase dúrica se refiere a una capa cementada y endurecida con sílice de origen piroclástico que se conoce comúnmente tepetate y no se fragmenta con facilidad.

Factores geológicos

Material Parental

El material parental es el soporte físico sobre el cual ocurre la génesis de los suelos, determina las formas del relieve y condiciona los procesos de degradación (Hernández, 1995). Su importancia en los suelos estriba en los rasgos hereditarios, conforme avanza el proceso de meteorización, que determinan su vulnerabilidad a la degradación.

Una clasificación primaria del material parental es aquella basada en el origen de las rocas; así, se diferencian tres tipos de ellas: ígneas, metamórficas y sedimentarias. De acuerdo a su dureza relativa, éstas pueden agruparse en blandas (sedimentarias) y duras (metamórficas e ígneas). Esta clasificación plantea que las rocas ígneas y metamórficas son más compactas y prácticamente impermeables. Por otro lado, las rocas sedimentarias presentan una mayor

porosidad, la cual permite el paso de agua al interior de la roca; lo que favorece su meteorización y una mayor susceptibilidad a la erosión.

Distancia a Volcanes

La edad de los aparatos volcánicos y la distancia radial a los cráteres controlan el tipo de suelos, las fases físicas presentes y la profundidad de los flujos piroclásticos. Así, entre más antiguos sean los depósitos piroclásticos, por procesos erosivos acumulados, más someros tenderán a ser los suelos. Por otro lado, la distancia a los conos volcánicos, en función de los vientos dominantes, condiciona el espesor de las cenizas volcánicas depositadas; las cuales a través de procesos de intemperismo químico favorecen ciertos tipos de suelos presentes en las zonas volcánicas (Lizcano *et al.*, 2006). Los tipos de suelo presentes en estas áreas, además de ser producto de la intensidad del intemperismo (clima-vegetación) y de la edad de los depósitos, están condicionados por la pendiente del terreno; la cual determina zonas de degradación, tránsito y deposición. Esta combinación de factores, en las inmediaciones de los conos volcánicos de la región, ha dado como resultado perfiles altitudinales con suelo tipo andosol, luvisol, cambisol, feozem, regosol, o vertisol; siendo los andosoles y luvisoles los más propensos a la formación de cárcavas debido a cambios climáticos o de uso de suelo.

Distritos de Desarrollo Rural

Los Distritos de Desarrollo Rural (DDR) tienen como objetivo fundamental, el mejoramiento del bienestar de la población rural y, el incremento de los niveles de producción, empleo e ingreso en el país, con base en una mayor participación de las comunidades rurales.

Los DDR comprenden 192 zonas con características ecológicas y socio-económicas homogéneas para la actividad agropecuaria, forestal, acuícola y agroindustrial bajo condiciones de riego, de drenaje temporal y de acuacultura con objeto de planear, fomentar y promover el desarrollo rural integral. Funcionan mediante la coordinación de las acciones que realiza la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), en materia de planeación y ejecución de los programas operativos y en la concertación de los sectores social y privado y la coordinación con los gobiernos

municipales y con las dependencias y entidades estatales y federales que participan en el Programa de Desarrollo Rural Integral en el ámbito local (SAGARPA, 1988).

2. Marco biofísico del área de estudio

La provincia fisiográfica del Eje Neovolcánico Mexicano (EVM) se caracteriza por presentar una buena precipitación (700 – 900 mm, promedio anual) y buenos suelos agrícolas, principalmente de origen volcánico (cenizas) que han estado sujetos a cambios de suelo históricos (Bocco, 1989). Actualmente el EVM presenta un proceso de deterioro progresivo como resultado de la contaminación, fragmentación de hábitat, deforestación y erosión de suelos, que repercuten en la productividad de la misma (Romero y Velázquez, 1999). De acuerdo a Bocco (1989) los procesos de erosión antrópica, en especial los acaravamientos, son fenómenos muy desarrollados en esta región del país.

Geografía

El área de estudio corresponde a la provincia fisiográfica EVM también llamada Faja Volcánica Transmexicana (Escalante *et al.*, 2007). Esta área forma parte de la Zona de Transición Mexicana entre la región Neártica y Neotropical (Morrone y Márquez, 2003; Morrone, 2005, 2006). Se ubica en la parte central de México, ocupa una superficie aproximada de 160,693 km² (INEGI, 2000) y representa aproximadamente el 8% de la superficie del país. Sus coordenadas extremas se encuentran entre los paralelos 17° 30' y 20° 25' de latitud norte y los meridianos 96° 20' y 105° 20' de longitud oeste (Ferrusquía-Villafranca, 1993; Romero y Velázquez, 1999). En su parte central y oriental posee una dirección preferencial de E-W y en su parte occidental WNW-ESE, formando un ángulo cercano a los 16° con respecto a la Trinchera Mesoamericana (Gómez-Tuena *et al.*, 2005).

El EVM se extiende (Figura I—1) desde la costa del Océano Pacífico, en San Blas (Nayarit) y Bahía de Banderas (Jalisco), hasta las costas del Golfo de México en Palma Sola (Veracruz) (Demant, 1978; Gómez-Tuena *et al.*, 2005). Abarca los estados de Aguascalientes, Colima, Distrito Federal, Guanajuato, Guerrero, Hidalgo, Jalisco, Estado de México, Michoacán, Morelos, Nayarit, Oaxaca, Puebla, Querétaro, Tlaxcala, Veracruz y Zacatecas (INEGI, 2013). Limita con las provincias fisiográficas: Sierra Madre Occidental al poniente, Mesa del Centro al norte, Sierra Madre Oriental al oriente, Llanura Costera del

Golfo del Norte al noroeste, Llanura Costera del Golfo Sur al sureste y Sierra Madre del Sur al sur (INEGI, 2000).

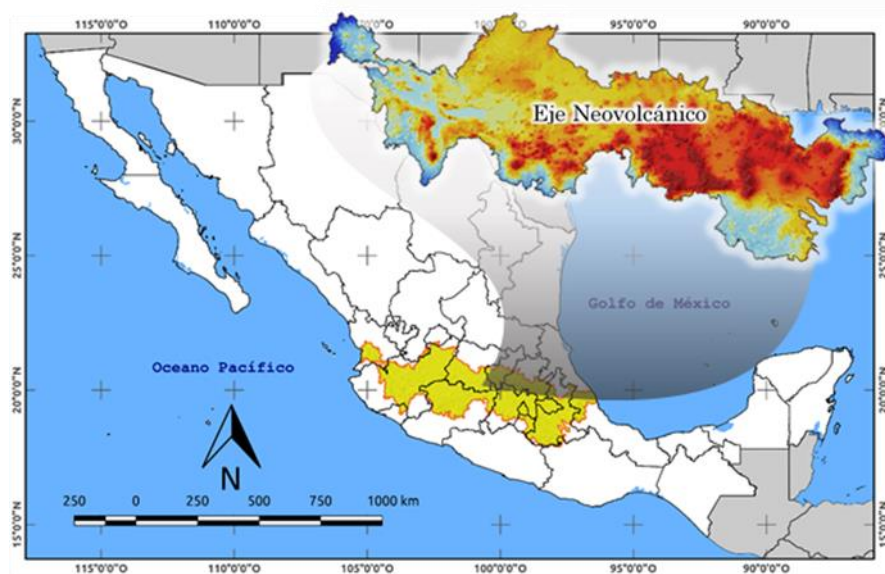


Figura I—1. Localización del área de estudio.

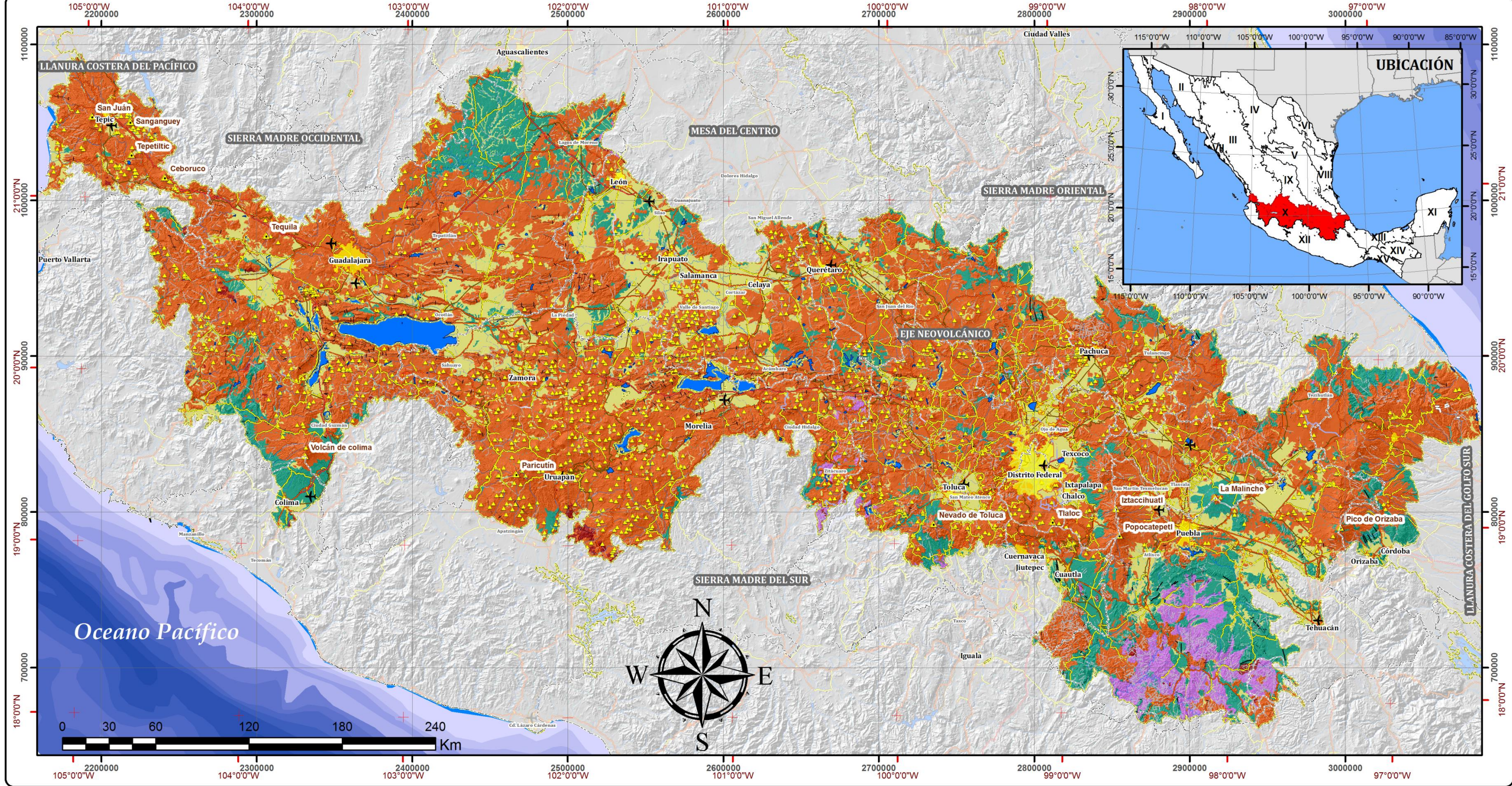
Geomorfología

El EVM es un arco magmático continental (Demant, 1978; Gómez-Tuena *et al.*, 2005), cuyo origen es el resultado de la acción directa o indirecta de la subducción de las placas de Rivera (en su parte occidental) y Cocos (en el sureste), debajo de la placa de Norte América (Demant, 1978; Pardo y Suárez, 1995; Ferrari *et al.*, 1999). El arco se ha desarrollado durante los últimos 19 millones de años, a partir de la segunda mitad del Terciario y continúa hasta el presente (Medina *et al.*, 2010). Su evolución geológica se sintetiza en cuatro sucesos volcánicos principales (Gómez-Tuena *et al.*, 2005): (1) la instauración de un arco de composición intermedia en el Mioceno medio y tardío (~19 – 10 Ma); (2) un episodio máfico del Mioceno tardío (~10 – 7.5 Ma); (3) un episodio silícico (~7.5 – 5.0 Ma) de finales de Mioceno, que llega a ser bimodal (5.0 – 3.0 Ma) en el Plioceno temprano; y (4) la reinstauración de un arco con gran variabilidad composicional a partir del Plioceno tardío. De acuerdo a su geología y tectónica el EVM ha sido dividido en tres sectores principales: occidental, central y oriental (Pasquaré *et al.*, 1987; Aguayo y Trápaga, 1996; Gómez-Truena *et al.*, 2005). El sector occidental se ubica entre la costa del Golfo de California y los rifts de Zacoalco (Jalisco), Chapala y Colima; la sección central se ubica entre la sección occidente y el sistema de fallas Taxco (Guerrero) - San Miguel de Allende

(Guanajuato); y la sección oriental entre la anterior sección y la costa del Golfo de México (Gómez-Truena *et al.*, 2005).

La composición de las rocas que conforman el EVM, desde el punto de vista químico, es muy diversa. El EVM es considerado como una provincia calco-alcalina, caracterizada por su abundancia de andesitas y dacitas y por la relación que guardan sus contenidos de SiO_2 y $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ (Morán, 1985). De acuerdo con INEGI (2002) (Figura I—2) en el EVM se registran 68 tipos de rocas (Anexo 1) pertenecientes a las clases: ígnea extrusiva (65 %) e intrusiva (0.35 %), sedimentaria (13 %), metamórfica (2 %) y N/A (19 %), cuyo origen tuvo lugar en diferentes eras y sistemas geológicos (Anexo 2).

El EVM está formado por aproximadamente 8,000 volcanes (Demant, 1978; Gómez-Truena *et al.*, 2005), sierras volcánicas, grandes coladas de lava, depósitos de ceniza, cuencas cerradas ocupadas por lagos y estructuras de calderas volcánicas (Medina *et al.*, 2010). Los principales elementos de este sistema montañoso son: el Pico de Orizaba, el cofre de Perote, los Cerros de las Derrumbadas, los Cerros del Piñal y del Tintero; la Malitzín y las Sierras de Tlaxco (Acopinalco y Singuilucan); la Sierra Nevada con la Iztaccíhuatl, el Popocatepetl, el Telapón, Tláloc y el Papayo; la Sierra del Ajusco con sus numerosos cráteres y los Cerros de Jalatlaco y de Ocuila; el Nevado de Toluca con las serranías de la Gavia, Valle de Bravo, Tlalpujagua y Angangueo; las Sierras de Maravatío, Ozamumatlán, Santa Clara y Pátzcuaro; las Sierras de Apatzingán, Jiquilpan y el Tigre; la Sierra de Tapalpa; y por último la Sierra de la Mascota localizada cerca del pacífico (Yarza, 2003).



Simbología

Límite estatal	Corrientes de agua	Clases de rocas	Entidad
Provincias fisiográficas	Intermiteinte	Metamórfica	Eje estructural
Aeropuerto	Perenne	Sedimentaria	Estructura tabular
Volcanes		Ígnea extrusiva	Falla
Cuerpos de agua		Ígnea intrusiva	Fractura
Localidad urbana		(Suelo Aluvial)	

Proyección Cónica Conforme de Lambert
Datum Horizontal: WGS 1984
Escala: 1:2,300,000
 Fuente:
 INEGI. Carta Edafológica. Escala 1:250,000. Serie I.
 INEGI. Conjunto de Datos Vectoriales Fisiográficos.
 Escala 1:1,000,000. Serie I
 Elaboró: Biol. Paula Zamora Tirado.

COLEGIO DE POSTGRADUADOS
 POSTGRADO EN EDAFOLOGÍA
 TESIS DE MAESTRÍA

GEOLOGÍA
ESCALA: 1:2,300,000

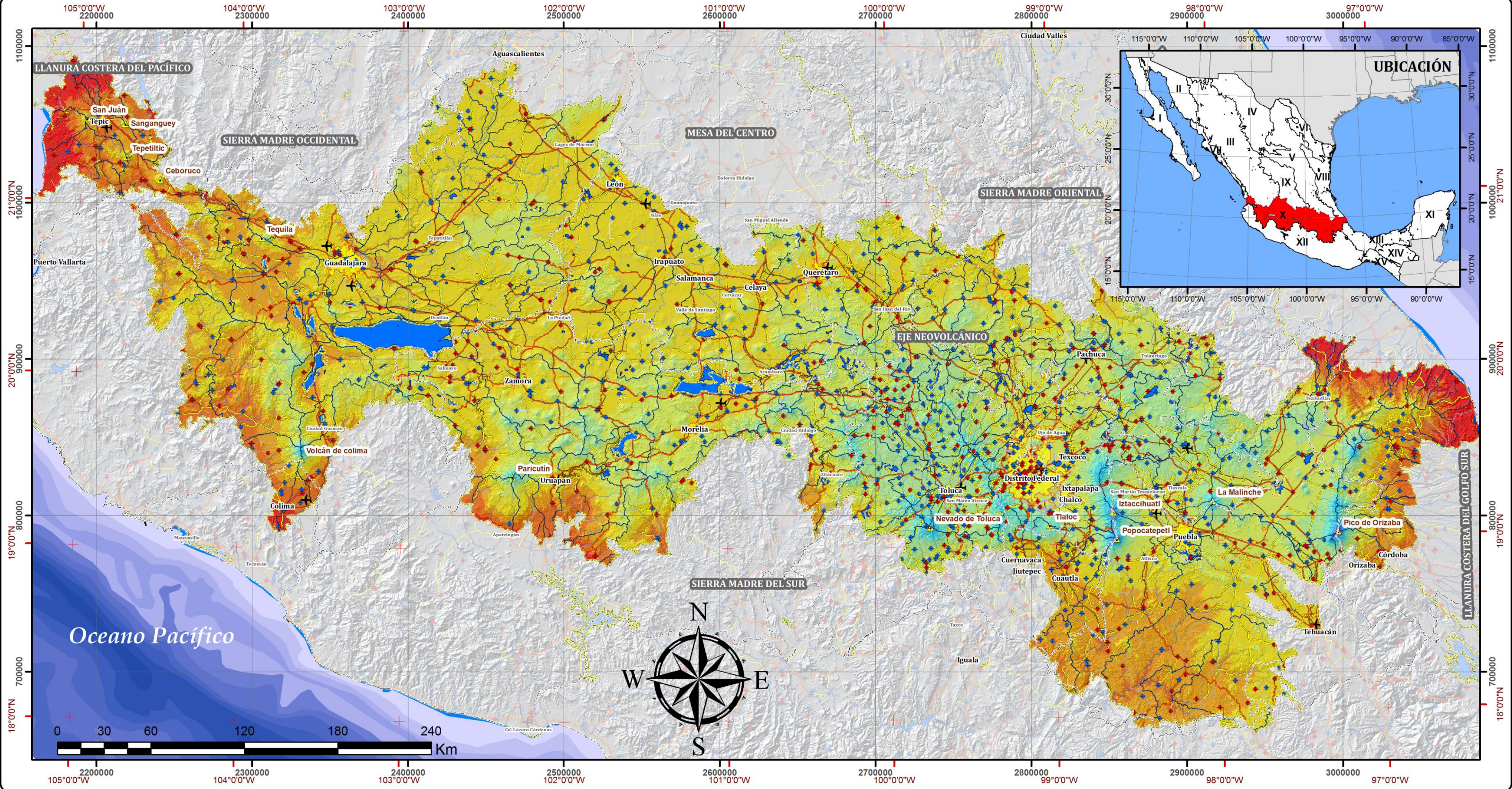
Figura I—2. Mapa geológico, y de estructuras volcánicas del Eje Volcánico Mexicano.

Topografía

El EVM tiene una anchura que varía entre los 80 y 230 km a lo largo de 1,000 km de longitud (Gómez-Tuena *et al.*, 2005). Es una de las provincias con mayor variación de relieve, registra altitudes que oscilan entre los 1,000 y poco más de 5,000 msnm (Figura I—3) y predominan las altitudes entre los 1,500 y 2,500 msnm (Ferrusquía-Villafranca 1993). El EVM, según INEGI (2002), se caracteriza por presentar diversas topoformas que van desde Sierras (40.33 %), lomeríos (24.01 %), llanuras (21.43 %), mesetas (10.26 %), valles (3.33 %), cañones (0.59 %) y depresiones (0.04 %). En el (Cuadro I—4) se muestran 14 las subprovincias fisiográficas en que se subdivide el Eje Neovolcánico Mexicano.

Cuadro I—4. Subprovincias fisiográficas del Eje Neovolcánico Mexicano.

Provincia Fisiográfica	Subprovincia Fisiográfica
Eje Neovolcánico Mexicano	Bajío Guanajuatense
	Chapala
	Chiconquiaco
	Escarpa limítrofe del sur
	Guadalajara
	Lagos y volcanes de Anáhuac
	Llanuras y sierras de Querétaro e Hidalgo
	Mil Cumbres
	Neovolcánica Tarasca
	Sierras de Jalisco
	Sierras del sur de Puebla
	Sierras neovolcánicas Nayaritas
	Sierras y bajíos michoacanos
	Volcanes de Colima



Simbología		Corrientes de agua		Rangos de elevación (m)	
	Límite estatal		Aeropuerto		2,500 - 3,000
	Provincias fisiográficas		Volcanes		3,000 - 3,500
	Subcuencas		Estaciones meteorológicas		3,500 - 4,000
	Cuerpos de agua		Operando		4,000 - 4,500
	Localidad urbana		Suspendida		4,500 - 5,000
					>5,000

Suelos

Los suelos dominantes en el EVM son: feozem (22 %), andosol (12.9 %), vertisol (19.8 %), cambisol (4.8%), litosol (10.6 %), luvisol (7.2%), y regosol (9.6 %) (INEGI, 1998) (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y Cuadro I—5), a los cuales INEGI (2004) los define de la siguiente manera:

Feozem: Tierra parda, suelo que se presentan en cualquier tipo de relieve y clima, excepto en regiones tropicales lluviosas o zonas muy desérticas. Tiene una capa superficial oscura, suave, rica en materia orgánica y en nutrientes. Cuando son profundos se ubican en terrenos planos y cuando son menos profundos en laderas. Su principal limitante es la roca o alguna cementación muy fuerte en el suelo y se erosionan con facilidad.

Andosol: Suelos de origen volcánico, constituidos principalmente por ceniza, contiene alófono que le otorga ligereza y untuosidad al suelo. Son generalmente de colores oscuros y tienen alta capacidad de retención de humedad. En condiciones naturales presentan vegetación de bosque o selva. El uso más favorable para su conservación es el forestal.

Vertisol: Suelo que se revuelve o que se voltea. Son de climas templados y cálidos, especialmente de zonas con una marcada estación seca y otra lluviosa. La vegetación natural va de selvas bajas a pastizales y matorrales. Se caracterizan por su estructura masiva y su alto contenido de arcilla, la que es expandible en húmedo formando superficies de deslizamiento llamadas facetas, y que por ser colapsables en seco pueden formar grietas en la superficie o a determinada profundidad. Su color más común es negro o gris oscuro y café rojizo. Tiene baja susceptibilidad a la erosión y alto riesgo de salinización.

Cambisol: Suelo que cambia, son suelos jóvenes, poco desarrollados que se pueden localizar en cualquier tipo de vegetación o clima excepto en las zonas áridas. Presentan en el subsuelo una capa con terrones con vestigios del tipo de roca subyacente y que puede tener acumulaciones de arcilla, carbonato de calcio, fierro o magnesio. También son suelos muy delgados que están encima de un tepetate. Son de moderada a alta susceptibilidad a la erosión.

Litosol: Suelo de piedra, se localizan en todos los climas y con muy diversos tipos de vegetación, en todas las sierras del país, barrancas, lomeríos y en algunos terrenos planos. Su profundidad es menor a 10 cm, limitada por la presencia de roca, tepetate o

caliche endurecido. La susceptibilidad a la erosión es muy variable que depende de otros factores ambientales. En bosques y selvas su uso es forestal y en matorrales o pastizales se puede realizar pastoreo más o menos limitado y en ocasiones agricultura.

Luvisol: Suelo con acumulación de arcilla, se ubican en zonas templadas o tropicales lluviosas y en ocasiones en climas secos. La vegetación es de bosque o selva y tiene un enriquecimiento de arcilla en el subsuelo. Son frecuentemente rojos o amarillentos, que tienen alta susceptibilidad a la erosión.

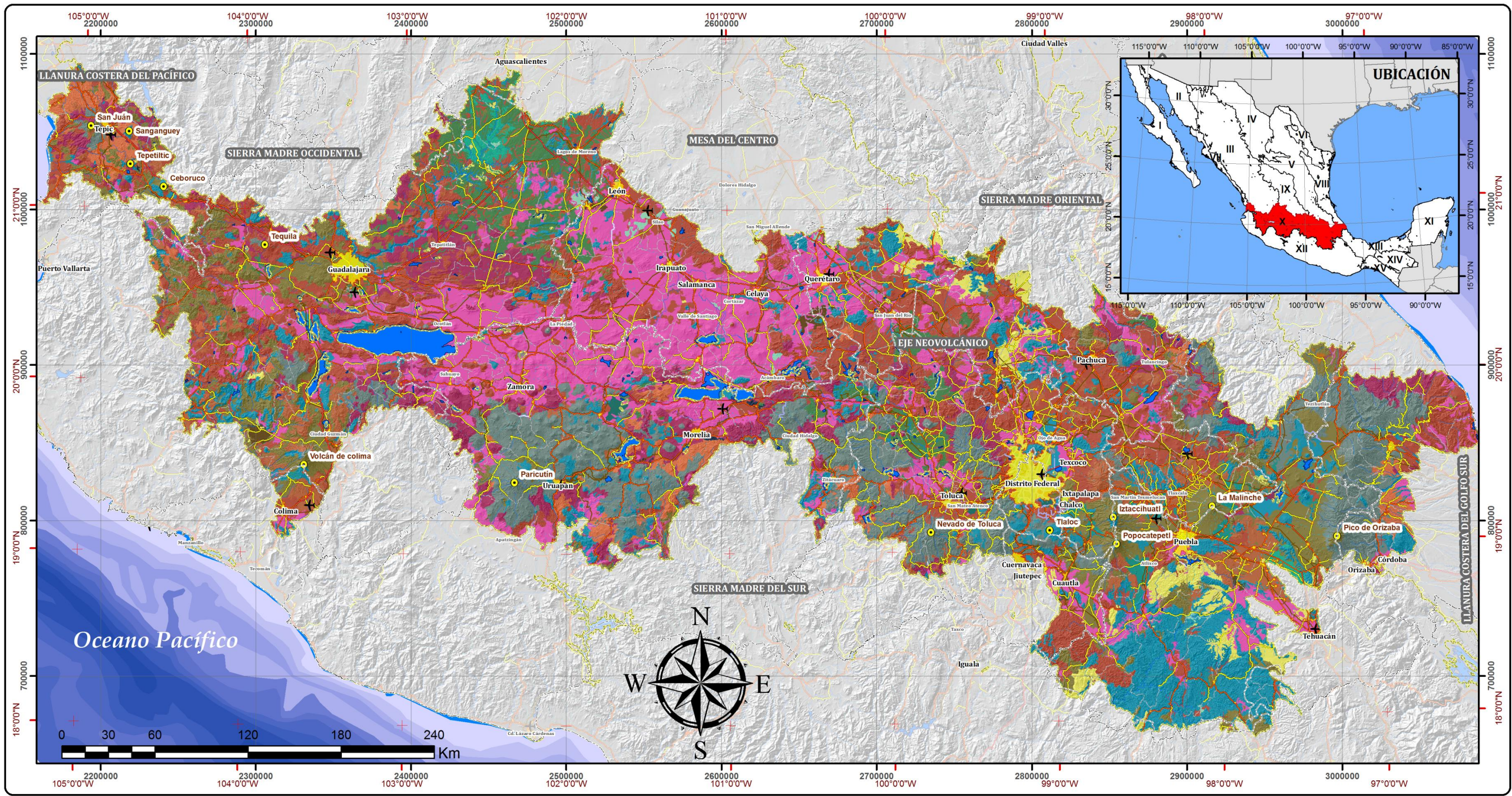
Regosol: Capa de material suelto que cubre a la roca. Se ubican en diversos tipos de clima, vegetación y relieve. Tienen poco desarrollo y no presentan capas muy diferenciadas entre sí. Son claros o pobres en materia orgánica, parecidos a la roca que les dio origen, se pueden asociar con Litosoles y con afloramientos de roca o tepetate, frecuentemente son someros.

Cuadro I—5. Tipos de suelos presentes en el Eje Neovolcánico Mexicano.

Unidad	Subunidad	Por ciento	Unidad	Subunidad	Por ciento
Sin Información		1.205	Litosol		10.655
	Sin Información	1.205			10.655
Acrisol		2.529	Luvisol		7.187
	férrico	0.002		crómico	4.110
	húmico	0.579		férrico	1.566
	órtico	1.948		gléyico	0.004
Andosol		12.971		órtico	0.867
	húmico	7.608		plíntico	0.017
	mólico	0.777		vértico	0.624
	ócrico	4.560	Nitosol		0.081
	vítrico	0.025		dístrico	0.061
Cambisol		4.778		éutrico	0.017
	cálcico	0.758		húmico	0.002
	crómico	0.696	Planosol		4.322
	dístrico	0.247		dístrico	0.004
	éutrico	2.082		éutrico	2.919
	ferrálico	0.193		húmico	0.154
	gléyico	0.011		mólico	1.184
	húmico	0.719		solódico	0.061
	vértico	0.072	Ranker		0.054
Castañozem		0.270			0.054
	cálcico	0.138	Regosol		9.667
	háplico	0.056		calcárico	0.776
	lúvico	0.076		dístrico	1.010
Chernozem		0.250		éutrico	7.881
	cálcico	0.069	Rendzina		1.841
	háplico	0.089			1.841
	lúvico	0.091	Solonchak		0.537
Feozem		22.093		gléyico	0.254
	calcárico	1.275		mólico	0.067
	gléyico	0.064		órtico	0.170

Unidad	Subunidad	Porcentaje	Unidad	Subunidad	Porcentaje
Fluvisol	háplico	17.724	Solonetz	takyrico	0.045
	lúvico	3.030		órtico	0.011
	calcárico	0.085	Vertisol	crómico	1.542
	dístrico	0.054		pélico	18.261
éutrico	0.891	Xerosol		cálcico	0.135
gléyico	0.019		háplico	0.233	
Gleysol	húmico	0.012	lúvico	0.111	
	mólico	0.044	Yermosol	háplico	0.013
	vértico	0.031			
Histosol		0.122			
	éutrico	0.122			

Procesamiento propio



Simbología

- Límite estatal
- Provincias fisiográficas
- ⊕ Localidad urbana
- ⊕ Cuerpos de agua
- Volcanes
- ✈ Aeropuerto
- Corrientes de agua**
- ⋯ Intermitente
- Perenne

Principales grupos de suelos

Acrisol	Feozem	Luvisol	Rendzina
Andosol	Fluvisol	Nitosol	Solonchak
Cambisol	Gleysol	Planosol	Solonetz
Castañozem	Histosol	Ranker	Vertisol
Chernozem	Litosol	Regosol	Xerosol
			Yermosol

Proyección Cónica Conforme de Lambert
Datum Horizontal: WGS 1984
Escala: 1:2,300,000
 Fuente:
 INEGI. Carta Edafológica. Escala 1:250,000. Serie I.
 INEGI. Conjunto de Datos Vectoriales Fisiográficos.
 Escala 1:1,000,000. Serie I
 Elaboró: Biol. Paula Zamora Tirado.

CP COLEGIO DE POSTGRADUADOS
 POSTGRADO EN EDAFOLOGÍA
 TESIS DE MAESTRÍA

SUELOS DOMINANTES
ESCALA: 1:2,300,000

Figura I—4. Mapa Edafológico del Eje Volcánico Mexicano.

Vegetación y Uso de suelo

El EVM se reconoce como una de las provincias biogeográficas más heterogéneas y complejas de México, resultado de sus lluvias en verano, origen geológico complejo y suelos con alta capacidad de almacenamiento de humedad (Espinosa y Ocegueda, 2007). Las características que esta provincia posee, no solo le han permitido una alta diversidad biológica (Fa y Morales, 1991; Villaseñor *et al.*, 2007) sino también contener un alto número de especies endémicas (Romero y Velázquez, 1999).

De acuerdo con (Rzedowski, 1978) los tipos de vegetación más característicos en el EVM son los bosques de pino-encino y zacatonales. Mientras que en la carta uso de suelo y vegetación del INEGI (2007) la vegetación dominante es: selva baja caducifolia (11.0%), pastizal inducido (7.6%), bosque de encino (6.7%) y bosque de pino (4.0%) y bosque de pino-encino (4.3 %); mientras que la agricultura de temporal (37.9 %) y la agricultura de riego (12.3 %) son las principales actividades económicas (Cuadro I—6). Considerando que a nivel nacional la agricultura temporal es de 52.5% y la de riego de 47.5% (SIAP, 2012).

Cuadro I—6. Uso de suelo y vegetación en el Eje Neovolcánico Mexicano.

Vegetación	Porcentaje	Vegetación	Porcentaje
Acuícola	0.0001	Palmar inducido	0.1172
Agricultura de humedad	0.5974	Palmar natural	0.0014
Agricultura de riego	12.2343	Pastizal cultivado	1.5692
Agricultura de temporal	37.9449	Pastizal halófilo	0.2368
Bosque cultivado	0.0865	Pastizal inducido	7.6127
Bosque de cedro	0.0105	Pastizal natural	2.1807
Bosque de encino	6.7125	Popal	0.0000
Bosque de encino-pino	1.5017	Pradera de alta montaña	0.1024
Bosque de galería	0.0044	Sabanoide	0.0228
Bosque de mezquite	0.0234	Selva alta perennifolia	0.1498
Bosque de oyamel	0.8735	Selva alta subperennifolia	0.0098
Bosque de pino	4.0055	Selva baja caducifolia	10.9706
Bosque de pino-encino	4.3219	Selva baja espinosa caducifolia	0.0004
Bosque de tascate	0.4575	Selva mediana subcaducifolia	0.4140
Bosque mesófilo de montaña	0.9196	Selva mediana subperennifolia	0.1792
Chaparral	0.1716	Sin vegetación aparente	0.1962
Manglar	0.0158	Tular	0.0301
Matorral crasicaule	2.0235	Vegetación de dunas costeras	0.0078
Matorral desértico micrófilo	0.0128	Vegetación de galería	0.0033
Matorral desértico rosetófilo	0.6337	Vegetación halófila hidrófila	0.0610
Matorral submontano	0.0165	Vegetación halófila xerófila	0.0006
Mezquital desértico	0.0161		
No aplicable	3.5501		

Hidrología

Los recursos hídricos del EVM están constituidos por ríos, arroyos y lagos. En la región nacen tres de los ríos más importantes de México, el Lerma – Santiago, el Panuco y el Balsas (16). La región también tiene amplias cuencas cerradas que forman lagos como el de Pátzcuaro y Cuitzeo o que fueron desecados como en el Valle de México, y fosas anegadas como la de Chapala.

Literatura citada

- Abarca, O. 2010. Desarrollo de un modelo de geoprocusamiento para la valoración productiva y tributaria de tierras agrícolas en Venezuela. Tesis Doctorado.
- Aguayo, J.E. y R. Trápaga. 1996. Geodinámica de México y minerales del mar. La Ciencia para Todos, Fondo de Cultura Económica, México, D.F.
- Baró, J. y R. Alemany. 2000. Estadística II. Ed. Fundación per a la Universitat Oberta de Catalunya. Barcelona.
- Bocco G. 1989. Cartografía geomorfológica y análisis morfométrico para estudios de erosión acelerada. Estudio de caso en la Cuenca del Río Tlalpujahuá, México. Boletín del Instituto de Geografía 19:39-54.
- Bocco, G. 1990. Gully erosion analysis using remote sensing and Geographic Information Systems; A case study in Central México. Tesis Doctorado. ITC, Enschede, The Netherlands.
- Bocco, G., J. L. Palacio, y C. Valenzuela. 1991. Erosión en cárcavas en el Sistema Volcánico Transversal. Un modelo utilizando percepción remota, sistemas de información geográfica y análisis geomorfológico. Boletín Instituto de Geografía 22: 1.24.
- Bosque-Sendra, J. 1997. Sistemas de información geográfica. Ed. Rialp.
- Buitrago-Escobar, J. Y. 2011. Desarrollo de un modelo de visualización de erosión hídrica en el municipio de Samacá (Boyacá). Estudio de caso. Magister. Universidad Nacional de Columbia.
- Bull, L.J. y M. J. Kirkby. 1997. Gully processes and modelling. Progress in Physical Geography 21(3): 354-374.
- Burke, L. y Z. Sugg. 2006. Modelamiento Hidrológico de la Descarga de las Cuencas Hidrológicas en el Arrecife Mesoamericano. Instituto de recursos mundiales.

- Campbell, J.B. 1996-2007. Introduction to Remote Sensing. New York: Guilford. (eds. 1-4) (1987, 1996, 2002, 2007).
- Cartaya, S., W. Méndez y H. Pacheco. 2006. Modelo de zonificación de la susceptibilidad a los procesos de remoción en masa a través de un sistema de información geográfica. *Interciencia* 31: 638-646.
- Carvacho-Bart, L. y M. Sánchez-Martínez. 2010. Comparación de índices de vegetación a partir de imágenes MODIS en la región del Libertador Bernardo O'Higgins, Chile, en el período 2001-2005. En: Ojeda, J., Pita, M.F. y Vallejo, I. (Eds.), *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos*. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla. Sevilla.
- Castro-Franco, M., M. B. Domenech y J. L. Costa. 2012. Relación cuantitativa entre atributos topográficos y rendimiento. *INTA. EEA Manfredi. Manfredi, Córdoba*.
- Chacón, J., C. Irigaray y T. Fernández, T. 1993. Análisis y cartografía a gran escala de factores condicionantes de movimientos de ladera mediante un S.I.G. V Reunión Nacional de Geología Ambiental y Ordenación del Territorio, Murcia 2: 585 – 594.
- Clérici, C. y F. García. 2001. Pérdidas de suelo por erosión en Uruguay y la región sur de la cuenca del Río de la Plata. *Agrociencia* 5(1): 92-103.
- Coops, N., P. Ryan y A. Loughhead. 1998. Overview of topographic position. Developing and testing procedures to predict topographic position from digital elevation models (MDE) for species mapping. <http://www.ffp.csiro.au/nfm/mdp/topo/over.htm>
- Demant A. 1978. Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación. *Revista Instituto de Geología* 2:172-187.
- Desir, G. y C. Marin, 2007. Effects of slope processes and management in gullying. En *Progress in gully erosion research*. Casalí, J., Giménez, R. Eds. Universidad Pública de Navarra, Dirección de Publicaciones, Pamplona.
- Domínguez, M. 2003. Geomorfología e inestabilidad de laderas en la Cuenca Carbonífera Central (Valle del Nalón, Asturias). Análisis de la susceptibilidad ligada a los movimientos superficiales del terreno. Tesis Doctorado. Oviedo.

- Echeverría, M.T., P. Ibarra y F. Pérez-Cabello. 2007. Agricultural land use, piping and gullies activity in the Huerva lower valley (Saragossa, Spain). En Progress in gully erosion research. (Casalí, J., Giménez, R. Eds.). Universidad Pública de Navarra, Dirección de Publicaciones, Pamplona.
- Espinosa, D. y S. Ocegueda. 2007. Introducción. In Biodiversidad de la Faja Volcánica Transmexicana, I. Luna, J. J. Morrone y D. Espinosa (eds.). Universidad Nacional Autónoma de México, México, D. F. p. 5-6.
- Fa, J.E. y Morales L.M. 1991. Mammals and protected areas in the Trans-Mexican Neovolcanic Belt. En: Mares M.A. y Schmidly D.J. Eds. Latin American Mammalogy: History, Biodiversity, and Conservation, pp. 199-226, University of Oklahoma Press, Norman.
- FAO, 2000. Manual on integrated soil management and conservation practices.
- Faulkner, H. 2006. Piping hazard on collapsible and dispersive soils in Europe. En Soil erosion in Europe. Boardman, J., Poesen, J., Eds.
- Ferrari, L., M. Lopez-Martinez, G. Aguirre-Diaz, y G. Carrasco-Nuñez. 1999. Space-time patterns of Cenozoic arc volcanism in central Mexico: from the Sierra Madre Occidental to the Mexican Volcanic Belt. *Geology* 27: 303–306.
- Ferrusquía-Villafranca, I. 1993. Geología de México: Una sinopsis. En: Ramamoorthy T.P., R. Bye, A. Lot y J. Fa (eds.). Diversidad biológica de México: Orígenes y distribución. Instituto de Biología, UNAM., México D. F.
- Figuroa S. B., A. Amante, H. G. Cortés, J. Pimentel, E. S. Osuna, J. M. Rodríguez y J. F. Morales. 1991. Manual de predicción de pérdidas de suelo por erosión. Secretaría de Agricultura y de Recursos Hidráulicos. Colegio de Postgraduados. México.
- Fuentes S. A. y Martínez O. O. 2001. Manual técnico de estabilización y forestación de cárcavas en cuencas hidrográficas. Dirección nacional del Servicio Estatal Forestal. Ministerio de Agricultura. La Habana, Cuba.
- Gilbert, M. A., J. González-Piqueras y J. García-Haro. 1997. Acerca de los índices de vegetación. *Revista de Teledetección* 8: 35-45.
- Graf, W. L. 1977. The rate law in fluvial geomorphology. *American Journal of Science* 277: 178-191.

- Gray, D. H. y R. B. Sortir. 1996. Biotechnical and soil bioengineering: Slope Stabilization, a practical guide for erosion control. John Wiley and Sons.
- Gómez-Gutiérrez, Á.; S. Schnabel y F. Lavado-Contador. 2011. Procesos, factores y consecuencias de la erosión por cárcavas; trabajos desarrollados en la Península Ibérica. Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles 55: 59-80.
- Gómez-Tuena, A., M. T. Orozco-Esquivel y L. Ferraro. 2005. Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana. Boletín de la sociedad geológica mexicana 3: 227-283. México.
- Grohmann, C. H. 2005. Trend-surface analysis of morphometric parameters: a case study in southeastern Brazil. Computers and Geosciences 31: 1007-1014.
- Guanca, V. A. 2010. Determinación de la Erosión Hídrica de los Suelos de la Cuenca del Río Pilcomayo – Salta. Tesina. Facultad de Ciencias Naturales. Universidad Nacional de Salta.
- Hernández, G. 1995. Modelo geomorfométrico aplicado al estudio de la eración en cárcavas. Rev. Geográfica de América Central 31: 59-95.
- Huete, A. R. 1988. A soil-adjusted vegetation index. Remote Sensing of Environment 25: 295 -309.
- Hutchinson, D.E y H. W. Pritchard. 1976. Resource conservation glossary. Journal of Soil and Water Conservation 31: 1-63.
- INEGI. 1998. Conjunto de Datos Vectoriales Edafológicos. Continuo Nacional. Escala 1: 250 000. Serie I. México. www.inegi.org.mx.
- INEGI. 2000. Conjunto de datos vectoriales de la carta provincias fisiográficas. Escala 1: 1,000,000. México. www.inegi.org.mx
- INEGI. 2002. Conjunto de Datos Vectoriales Geológicos. Continuo Nacional. Escala 1: 250 000. Serie I. México. www.inegi.org.mx.
- INEGI. 2004. Guía para la Interpretación de Cartográfica. Edafología. México. www.inegi.org.mx.
- INEGI. 2007. Conjunto de Datos Vectoriales Uso del Suelo y Vegetación. Continuo Nacional. Escala 1:250 000. Serie IV. México. www.inegi.org.mx.
- INEGI. 2013. Áreas Geoestadísticas Estatales del Marco Geoestadístico Nacional del Instituto nacional de Estadística y geografía. Escala 1: 250 000. México. www.inegi.org.mx.

- Ireland, H.A., C. F. S. Sharpe y D. H. Eargle. 1939. Principles of gully erosion in the piedmont of south Carolina. Technical Bulletin of U.S. Dept. of Agriculture 63: 143.
- Iroume A., J. Gayoso, y M. Hernández. 1994. Caracterización de cárcavas en las regiones VIII y de Chile. Bosque 15 (2): 65-75.
- Johnson, D. E. 2000. Métodos multivariados aplicados al análisis de datos. México. Internacional Thomson editores.
- Jordan, G. 2008. Digital Terrain Analysis in a GIS Environment: Concepts and Development. pp 1-43 En: Peckham, R.J; Jordan, G. 2008. Digital Terrain Modelling: Development and Applications in a Policy Support Environment. Spriger.
- Kennelly, P. J. 2008. Terrain maps displaying hill-shading with curvature. Geomorphology.102, 567–577.
- Kienzle, S. 2004. The effect of MDE raster resolution on first order, second order and compound terrain derivatives. Transactions in GIS, 8 (1): 83-111.
- Knapen, A., J. Poesen, G. Govers, G. Gysels, y J. Nachtergaele. 2007. Resistance of soils to concentrated flow erosion: A review. Earth-Science 80: 75-109.
- Laval, E. 2009. Determinación de erosión actual y fragilidad de suelos en la V Región utilizando datos satelitales y SIG. Informe Final.
- Leiva, N. 2012. Metodología para el cálculo de la humedad del suelo usando parámetros topográficos (MDE), climáticos y edáficos en un sector del piedemonte depositacional del municipio de Villavicencio. Tesis de Magister en Geomática. Universidad Nacional de Colombia Facultad de Agronomía.
- Lillesand, M., R. W. Kiefer y J. Chipman. 2007. Remote Sensing and Image Interpretation, 6th Edition, Editors John Wiley & Sons.
- Lizcano, A., M. C. Herrera y J. C. Santamarina. 2006. Suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia, Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura 6 (2): 167-196.
- López B., J. y J. L. Palacio. 1995. Cuantificación del crecimiento de las áreas erosionadas en cabeceras de cárcavas procesando imágenes de video. Núm. Esp. Bol. Inst. Geografía 3: 77-100.
- Martínez-Casasnovas, J.A. 1998. Suelo-Paisaje-Erosión. Erosión por cárcavas y barrancos en el Alt Penedès – Anoia (Cataluña). Un enfoque de estudio mediante tecnologías de la información espacial: Bases de datos, SIG y Teledetección. Tesis doctorado. Universitat de Lleida, Lleida.

- Martínez-Casasnovas, J. A., M. C. Ramos y J. Poesen. 2004. Assessment of sidewall erosion in large gullies using multi-temporal DEMs and logistic regression analysis. *Geomorphology* 58: 305-321.
- Medina-Chena A., T. E. Salazar-Chimal y J. L. Álvarez-Palacio. 2010. Fisiografía y suelos, en E. Florescano y J. Ortiz Escamilla (coordinadores). Atlas del Patrimonio Natural, Histórico y Cultural de Veracruz Tomo 1 Patrimonio Natural. 1ª Edición. México, D. F.
- Milevski, I. S., S. Dragicevic y Kostadinov. 2007. Digital elevation model and satellite images an assessment of soil erosion potential in the Pcinja catchment. *Bulletin of the Serbian geographical society* 2 11-20.
- Montesinos-Aranda, S. 2002. Desarrollo metodológico para la evaluación del riesgo de erosión hídrica en el área mediterránea utilizando técnicas de teledetección y GIS. Tesis Doctorado. Universidad Complutense de Madrid.
- Moore, I. D., G. J. Burch y D. H. Mackenzie. 1988. Topographic effects on the distribution of surface soil water and the location of ephemeral gullies. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* 31:1098-1107.
- Moore, I. D.; R. B. Grayson y A. R. Ladson. 1991. Digital terrain modelling: a review of hydrological: Geomorphological and biological applications. *Hydrological Processes* 5: 3-30.
- Morán-Zenteno, D. 1985. Geología de la República Mexicana. ed. SSP (INEGI)-UNAM. México.
- Morgan, P. C. 1997. Erosión y conservación del suelo. Madrid. Ed. Mundi-Prensa.
- Morgan, R.P.C. 2005. Soil Erosion and Conservation. 3rd edition. Blackwell Publishing, Oxford.
- Morrone J.J. y J. Márquez. 2003. Aproximación a un atlas biogeográfico mexicano: componentes bióticos principales y provincias biogeográficas. En: Morrone J. J. y Llorente-Bousquets J. Eds. Una Perspectiva Latinoamericana de la Biogeografía, pp. 217-220. Las Prensas de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F.
- Morrone J.J. 2005. Hacia una síntesis biogeográfica de México. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 76:207-252.
- Morrone J.J. 2006. Biogeographic areas and transition zones of Latin America and the Caribbean Islands based on panbiogeographic and cladistic analyses of the Entomofauna. *Annual Review of Entomology* 51:467-494.
- Nachtergaele, J. y J. Poesen. 1999. Assessment of soil losses by ephemeral gully erosion using high-altitude (stereo) aerial photographs. *Earth Surface Processes and Landforms* 24 (8): 693-706.

- Nachtergaele, J., J. Poesen, D. Oostwoud-Wijdenes y L. Vandekerckhove. 2002. Medium-term evolution of a gully developed in a loess derived soil. *Geomorphology* 46: 223-239.
- Olaya, V. 2009. Basic Land-Surface Parameters. En: T. Hengl y H. Reuter (Eds.), *Geomorphometry. Concepts, Software, Applications* (pp. 141 – 169). Amsterdam-Oxford: Elsevier.
- Olivares, F., 2009. Determinación del comportamiento de las precipitaciones y de su agresividad climática, en las regiones del Bío-Bío y de la Araucanía. Tesis Licenciatura, Ingeniero forestal. Talca, Chile.
- Ortiz, C. 2012. Adquisición Modelo de Superficie Digital DSM de alta resolución de bajo costo: Caso de estudio geología Estructural Cien Pesos Marmato. Tesis de Maestría en Sistemas de Información Geográfica. Colegio de Postgrados, Ecuador, Quito.
- Osterkamp, W. R. 2008. Annotated Definitions of Selected Geomorphic Terms and Related Terms of Hydrology, Sedimentology, Soil Science and Ecology, USGS. Reston, Virginia.
- Pacheco-Gil, H. A. 2012. Zonificación de amenaza por movimientos en masa: En la vertiente norte del Macizo Avila, utilizando tecnologías de la información geográfica. Ed. Gil.
- Palacio-Prieto, J. L. 1990. Determinación de áreas de erosión potencial en Cárcavas: un ejemplo en el centro de México. *Investigaciones Geográficas* 21: 45-55.
- Pardo, M., y G. Suárez. 1995. Shape of the subducted Rivera and Cocos plate in southern Mexico: Seismic and tectonic implications. *J. Geophys. Res.* 100: 12357-12373.
- Pasquaré, G., L. Vezzoli y A. Zanchi. 1987. Morphological and structural model of Mexican Volcanic Belt. *Geofis. Int., Spec. Vol. on Mexican Volcanic Belt-Part 3B*, 26 (2): 159-176.
- Patton, P.C. y S. A. Schumm. 1975. Gully erosion, northwestern Colorado: a threshold phenomenon. *Geology* 3: 88-90.
- Peralta, M. 1977. Las cárcavas y su control. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Forestales. Manual 5.
- Pizarro, R., F. Cornejo, C. González, K. Macaya y C. Morales. 2008. Análisis del comportamiento y agresividad de las precipitaciones en la zona central de Chile. *Ingeniería Hidráulica en México y Universidad de Talca*. Talca, Chile. XXIII 2: 91-108.
- Poesen, J.W., K. Vandaele y B. Wesemael. 1996. Contribution of gully erosion to sediment production on cultivated lands and rangelands. In: Walling, D.E., Webb, B.W. (Eds.), *Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives*. IAHS Publication, vol. 236. IAHS Press, Wallingford.

- Poesen, J. y J. M. Hooke. 1997. Erosion, flooding and channel management in Mediterranean environments of southern Europe. *Progress in Physical Geography* 21(2): 157-199.
- Poesen, J., E. De Luna, A. Franca, J. Nachtergaele y G. Govers. 1999. Concentrated flow erosion rates as affected by rock fragment cover and initial soil moisture content. *Catena* 36: 315-329.
- Poesen, J., J. Nachtergaele, G. Verstraeten y C. Valentin. 2003. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. *Catena* 50: 91-133.
- Poole, P. 1995. Appropriate geomatic technology for local earth observation. En: Dicum, G., (Ed.), *Local Heritage in the Changing Tropics: Innovative Strategies for Natural Resource Management and Control* 98: 156-166.
- Quirós-Rosado, E. M. 2009. Clasificación de imágenes multiespectrales aster mediante funciones adaptativas. Tesis Doctorado. Universidad Extremadura.
- Regües, D., G. Pardini, F. Gallart. 1995. Regolith behavior and physical weathering of clayey mudrock as dependent on seasonal weather conditions in a badland area at Vallcebre, Eastern Pyrenees. *Catena*, 25 (1-4): 199-212.
- Revollo, M. A. 2001. Determinación de caudales de crecida para la Cuenca del río Morochata mediante el modelo hidrológico HEC-HMS. Tesis profesional de Maestría en recursos Hídricos. Bolivia. Centro de Levantamientos Aeroespaciales y Aplicaciones SIG para el desarrollo sostenible de los recursos naturales CLAS.
- Rivera, P. H. 1998. Control de cárcavas remontantes en zonas de ladera mediante tratamientos biológicos. *Avances Técnicos Canicafé* 256: 8-12.
- Rodríguez-Veloz, H. I. 2004. Sistema de análisis multivariante de datos geoespaciales de una cuenca hidrográfica. Tesis Maestría. Universidad de Los Andes.
- Romero, F.J. y A. Velázquez. 1999. La región de montaña del sur de la Cuenca de México: una revisión de su importancia biológica. En: Velázquez A. y F. J. Romero (eds.). *Biodiversidad de la región de montaña del sur de la Cuenca de México: bases para el ordenamiento ecológico*. UAM-X-SEMARNAP.
- Rzedowski, J. 1978. *Vegetación de México*. Limusa, México.
- SAGARPA. 1988. Acuerdo por el que se establecen Distritos de Desarrollo Rural y sus Centros de Apoyo. Consultado el 7 de enero, 2014, de:

<http://www.sagarpa.gob.mx/Transparencia/pot2009/XIV%20Marco%20Normativo/ACUERDO%2008-08-1998.pdf>

- SCSA (Soil Conservation Society of America). 1982. Resource conservation glossary. Ankeny, IA, USA.
- SIAP (Servicio de información agroalimentaria y pesquería). 2012. Anuario estadístico de producción agrícola. Consultado el 15 de junio, 2014 de <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-cultivo/>
- Suet, C y Y. Liam. 2004. Comparison of flow routing algorithms used in Geographic Information Systems. University of Southern California, Faculty of Graduate School.
- Torri, D. y G. Rodolfi. 2000. Badlands in changing environments: an introduction. *Catena* 40: 119–125.
- Valcarcel, R. 1989. Estudio de los procesos erosivos en una microcuenca: Zona Central de España -Puebla de Valles (Guadalajara). Universidad Politécnica de Madrid.
- Valentin, C., J. Poesen y L. Yong. 2005. Gully erosion: Impacts, factors and control. *Catena* 63: 132-153.
- Vanwalleghem, T., J. Poesen, J. Nachtergaele, y G. Verstraeten. 2005. Characteristics, controlling factors and importance of deep gullies under cropland on loess-derived soils. *Geomorphology* 69: 76-91.
- Villaseñor J.L. y Ortiz E. 2007. La familia Asteraceae. En: Luna I., Morrone J.J. y Espinoza D. Eds. Biodiversidad de la Faja Volcánica Transmexicana, pp. 289-310, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F.
- Weiss, A. 2001. Topographic Position and Landforms Analysis. Poster presentation, ESRI User Conference, San Diego, CA.
- Wischmeier, W. H., y J. V. Mannering. 1969. Relation of soil properties to its erodibility. *Soil Science Society of America Proceedings* 33, 131-4.
- Wischmeier, W. H. y D. D. Smith. 1978. Predicting rainfall erosion losses- A guide to conservation planning. USDA Handbook.
- Yarza, E. 2003. Los volcanes del Sistema Volcánico Transversal. *Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía, UNAM* 50:220-234.
- Zepeda-Castro H. 2008. La vegetación en cárcavas y su efecto sobre la erosión: una base para la restauración autosostenible de áreas de alta erosión en la cuenca de Cuitzeo. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Tesis Doctorado.

Zimmermann, N. E. 2000. Consultado el 7 de enero, 2014, de:

<http://www.wsl.ch/staff/niklaus.zimmermann/biophys/#Topo.html>

CAPITULO II: CARACTERIZACIÓN DE VARIABLES AMBIENTALES QUE INCIDEN EN LA FORMACIÓN DE CÁRCAVAS DEL CENTRO DE MEXICO

Characterization of Environmental Parameters Affecting Gully Erosion in Central Mexico

Paula Erika Zamora-Tirado¹, Demetrio Salvador Fernández-Reynoso^{1‡}, Mario Roberto Martínez-Menez¹, Lenom Cajuste-Bontemps¹

RESUMEN

La dinámica erosiva de las cárcavas constituye una de las principales causas de degradación de los suelos. Las cárcavas son consideradas como canales profundos de paredes escarpadas que pueden formarse en paisajes naturales, sobre litologías favorables y por las actividades antrópicas. En este trabajo, por medio de un Sistema de Información Geográfica, se caracterizaron los parámetros ambientales que influyen en la formación de cárcavas del Eje Neovolcánico Mexicano a través de: suelo, fase física, erosionabilidad, tipo de roca, pendiente, longitud de pendiente, orientación, curvatura horizontal y vertical, índice de posición topográfica, índice topográfico de humedad, índice de Fournier, índice de vegetación ajustado al suelo y distancia a estructuras volcánicas. La mayoría de las cárcavas muestreadas (301 sitios) se ubicaron entre 2600 y 2700 msnm (24%), sobre materiales volcánicos (96%), en luvisoles de más de un metro de profundidad (39%), en pendientes entre 8 y 12% (44.3%), con orientación Este-Sur (48%), curvatura horizontal (54% en terrenos convexos), curvatura vertical (57% en terrenos convexos), longitud de pendiente entre 50 y 100 m (27.6%), índice de posición topográfica correspondiente a pies de monte (40%), índice topográfico de humedad (valor de 7) propio de los pies de monte (50%), distancia a estructuras volcánicas entre 800 y 1000 m (21.4%), lluvias de muy baja agresividad (Índice de Fournier: 40 a 50) en el 39.5% de las cárcavas y valores de SAVI (0.10 a 0.12) relacionados con suelos desnudos (49.8%). Para las variables indicadas se realizó un análisis de componentes principales (ACP) para identificar las variables que

¹ Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. 56230 Montecillo, Estado de México.

‡ Autor responsable (demetrio@colpos.mx).

mejor expliquen su formación. El ACP indicó que el primer componente explica el 95.06% de la variabilidad total de la formación de las cárcavas. Las variables: distancia a volcanes, longitud de la pendiente y fase física reportaron el mayor impacto en la formación de las cárcavas.

Palabras clave: *erosión en cárcavas, análisis de componentes principales, eje neovolcánico mexicano.*

SUMMARY

Gully erosion is a major problem for soil degradation. Gullies are considered deep channels with steep walls that can form in natural landscapes, on favorable lithologies and propitiated by human activities. In this paper, using a Geographic Information System, were characterized environmental parameters that influence gully formation, in the Mexican Neovolcanic, such as: rock type, soil type, soil's physical phase, terrain slope, terrain aspect, horizontal curvature, vertical curvature, length of slope, topographic position index, topographic wetness index, Fournier index, soil adjusted vegetation index (SAVI) and distance from volcanic structures. Most of the gullies sampled (301 sites) were between 2600 and 2700 m.a.s.l. (24 %) on volcanic materials (96%) in luvisols over one meter deep (39%), on slopes between 8 and 12 % (44.3 %) , with east-south aspect (48%), horizontal curvature (54% in convex slopes), vertical curvature (57% in convex slopes), slope length between 50 and 100 m (27.6 %), topographic position index related to foothills (40 %), topographic wetness index (value of 7) associated to foothills (50 %), distance to volcanic structures between 800 and 1000 m (21.4 %), in areas (39.5 % of gullies) with very low rainfall aggressiveness (Fournier Index: 40 to 50), and SAVI values (0.10 to 0.12) associated to bare soils (49.8 %). For the given variables, a principal component analysis (PCA) was performed to identify the environmental parameters that best explain their formation. The ACP's first component concentrates 95.06% of total variability on gully formation. Variables such as distance to volcanoes and slope length reported the greatest impact on gully formation.

Index words: *gully erosion, principal component analysis, trans-mexican volcanic belt.*

INTRODUCCIÓN

La provincia fisiográfica Eje Neovolcánico Mexicano (EVM) presenta una importante degradación territorial, que se ha manifestado desde la época prehispánica; cuando el centro de México era altamente poblado y se cultivaba, principalmente con maíz, en suelos de origen volcánico (Bocco, 1989). Actualmente los procesos de erosión por cárcavas son frecuentes y relevantes, lo que ocasiona importantes pérdidas económicas y ambientales en la región. La presencia de cárcavas en un terrero representa un estado avanzado y completo de erosión, cuyo deterioro local es mayor que otros tipos de erosión (Sámamo, 2009).

Se entiende por cárcavas a canales, más o menos profundos, originados por el socavamiento repetido del terreno por flujos de agua concentrados. Generalmente estos canales solo llevan agua durante e inmediatamente después de fuertes precipitaciones (Poesen *et al.*, 2003). La erosión en cárcavas se presenta en forma efímera o permanente, la primera se asocia a terrenos agrícolas y pueden ser eliminadas con herramientas de labranza, mientras que las permanentes se asocian a otros usos de suelo y su presencia no puede ser eliminada con implementos de laboreo (Casalí *et al.*, 1999; Gómez *et al.*, 2011).

En la mayoría de las ocasiones las cárcavas se forman por procesos antropogénicos, como sobrepastoreo, construcción de caminos, cortes en ladera para conformar explanadas. Su desarrollo está influenciado por factores físicos como la topografía, forma y tamaño de la cuenca, intensidad y cantidad de lluvia, longitud y gradiente de laderas (Bocco, *et al.*, 1991). Por lo tanto, la ocurrencia, intensidad y evolución de las cárcavas es resultado de la interacción de una gran variedad de factores geológicos, climáticos, edáficos, hidrológicos y de manejo de terreno, tales como: propiedades del suelo, tipo de material parental, uso y manejo de la cubierta vegetal, fluctuaciones climáticas y alteraciones topográficas (Valcarcel, 2003; Poesen *et al.*, 2003).

El desarrollo de cárcavas, por su acción erosiva, genera importantes daños por la pérdida de suelo fértil y la colmatación de cuerpos de agua. El suelo se pierde por la salpicadura de la lluvia, en el suelo desnudo de las paredes de la cárcava, y por el desprendimiento y arrastre de partículas de suelo que causa el flujo concentrado (Casalí *et al.*, 1999). Los tratamientos para controlar la formación de cárcavas son variables y dependen de los recursos disponibles y de las características de cada zona (Fuentes y Martínez, 2001).

Estudios de erosión por cárcavas del Eje Neovolcánico Mexicano son escasos y dispersos, sin embargo, consideramos que el grado de conocimientos alcanzado en México sobre la realidad regional por flujo concentrado es, aunque limitado, significativo y de alguna manera extrapolable a ambientes similares. La caracterización de las diversas variables que participan en el desarrollo de las cárcavas, es fundamental para la comprensión de las características del desarrollo de este tipo de erosión. Así, el objetivo del presente artículo es caracterizar las variables topográficas, climáticas, edafológicas, geológicas y de cobertura de vegetación que definen las cárcavas del Eje Neovolcánico Mexicano. Asimismo, se determinarán las variables que más influyen en el desarrollo de cárcavas de la región a través de un análisis multivariado de componentes principales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en la provincia fisiográfica Eje Neovolcánico Mexicano (160,693 km²). Sus coordenadas extremas se encuentran entre los paralelos 17° 30' y 20° 25' de latitud norte y los meridianos 96° 20' y 105° 20' de longitud oeste (Ferrusquía-Villafranca, 1993). Tiene una anchura que varía entre los 80 y 230 km, a lo largo de 1,000 km de longitud (Gómez-Tuena *et al.*, 2003). Se sitúa a una altitud de entre 1,000 y poco más de 5,000 msnm., y abarca los estados de Aguascalientes, Colima, Distrito Federal, Guanajuato, Guerrero, Hidalgo, Jalisco, Estado de México, Michoacán, Morelos, Nayarit, Oaxaca, Puebla, Querétaro, Tlaxcala, Veracruz y Zacatecas (INEGI, 2013). El relieve actúa, como Zona de Transición Mexicana entre la región Neártica y Neotropical (Morrone y Márquez, 2003; Morrone, 2005, 2006).

El EVM está formado por aproximadamente 8,000 volcanes (Demant, 1978; Gómez-Truena *et al.*, 2005), sierras volcánicas, grandes coladas de lava, depósitos de ceniza, cuencas cerradas ocupadas por lagos y estructuras de calderas volcánicas (Medina *et al.*, 2010). La composición de las rocas que conforman el EVM es muy diversa, de acuerdo con INEGI (2002), se registran 68 tipos de rocas pertenecientes a las clases: ígnea extrusiva (65%) e intrusiva (0.35%), sedimentaria (13%), metamórfica (2%) y N/A (19%). Los suelos dominantes son: feozem (22%), andosol (12.9%), vertisol (19.8%), cambisol (4.8%), litosol (10.6%), luvisol (7.2%), y regosol (9.6%) (INEGI, 1998). La vegetación dominante es:

selva baja caducifolia (11.0%), pastizal inducido (7.6%), bosque de encino (6.7%) y bosque de pino (4.0%) y bosque de pino-encino (4.3%) (INEGI, 2007). La agricultura de temporal (37.9%) y la agricultura de riego (12.3%) son las principales actividades productivas.

La gran diversidad biótica y abiótica que existe en el EVM ha permitido el establecimiento de asentamientos humanos por más de 2,500 años (Romero y Velázquez, 1999). Acorde al censo 2010 (INEGI), en el Eje Neovolcánico Mexicano habita el 49.8% de la población de México.

Obtención de la información

La obtención y preparación de datos utilizados para caracterizar las variables que influyen en el desarrollo de cárcavas, se basó en la construcción de una base de datos que permitiera su posterior almacenamiento y análisis, a través de ArcGIS versión 10. En el SIG se integró la información procedente de: la información de campo, cartografía temática, modelo digital de elevación, imágenes satelitales y datos de precipitación. La base de datos se generó con una resolución espacial de 30 x 30 m, una proyección Cónica Conforme de Lambert, y un datum horizontal WGS 1984.

La información de campo consistió en la geo-referenciación (GPS con una precisión ± 5 m), en varias entidades federativas, a lo largo del área de estudio, de áreas afectadas por la erosión en cárcavas. En campo se visitaron 301 cárcavas y en Google Earth Image ($\text{\textcircled{R}}2005$ Digital Globe), se capturaron los límites de cada cárcava (ver Anexo 4). El color del suelo y la escasa cobertura vegetal, asociados a la erosión en cárcavas, facilitó la identificación de los límites del área degradada.

La caracterización de las cárcavas observadas en campo se obtuvo a través de una consulta (*queries*), dentro de sus límites capturados (polígonos), sobre capas de información paramétrica asociada a la formación de cárcavas y de fácil acceso, tales como: unidad de suelo, fase física, clase textural, tipo de roca, pendiente, orientación, curvatura horizontal y vertical, longitud de pendiente, índice topográfico de humedad, índice de posición topográfica, distancia a estructuras volcánicas, índice de Fournier e índice de vegetación ajustado al suelo. Para conocer la relación espacial que existe entre las cárcavas muestreadas y las variables ambientales, se utilizó la herramienta *Geoprocessing*>*Clip* para

variables temáticas (procedente de la carta edafológica) y *Spatial Analyst Tools>Zonal>Zonal Statistics as Table* para variables continuas (MDE, imágenes de satélite e interpolaciones). A partir de esta información, se obtuvieron histogramas de frecuencia que expusieron la relación que existe entre las cárcavas y las variables seleccionadas.

Entre las variables edafológicas se consideró el tipo de suelo, fase física y clase textural. Esta información se obtuvo del Conjunto de Datos Vectoriales Edafológico (continuo nacional), serie II, escala 1:250,000 de INEGI (1998). La erosionabilidad se calculó con base en las unidades edafológicas identificadas en el EVM. A través de la carta Edafológica, se obtuvieron los valores estimados para el tipo de suelo y su textura de acuerdo a los datos generados por la FAO en 1970 (Figueroa *et al.* 1991).

El tipo de roca se obtuvo a través del Conjunto de Datos Vectoriales Geológicos (continuo nacional), serie I, escala 1:250,000 de INEGI (2002).

A continuación se indican las variables de tipo continuo, con una resolución de 30x30m, que se generaron para caracterización de las cárcavas georeferenciadas en campo:

Pendiente del terreno: se utilizó la herramienta *Spatial Analyst Tools>Surface>Slope* de ArcGIS versión 10. Los valores de pendiente se expresaron en porcentaje.

Orientación o Aspecto: el cálculo se llevó a cabo con la herramienta *Spatial Analyst Tools>Surface>Aspect* de ArcGIS versión 10. Sus valores se miden en grados desde 0° a 360°. Las orientaciones Norte tienen valores entre 315° y 360° y entre 0° y 45°, las Sur entre 135° y 225°, las Este y Oeste entre 45° a 135° y 225° a 315°, respectivamente. Las áreas planas que no tienen dirección de pendiente y les corresponde un valor de -1.

Curvatura Plana u Horizontal: se realizó con la herramienta *Spatial Analyst Tools>Surface>Curvature>out_plan_curve _raster* de ArcGIS versión 10. Un valor positivo indica que la superficie es convexa hacia arriba, en esa celda. Un plano negativo indica que la superficie es cóncava, hacia arriba. Un valor 0 indica que la superficie de esa celda es plana.

Curvatura de Perfil o Vertical: se realizó con la herramienta *Spatial Analyst Tools>Surface>Curvature>out_profile_curve_raster* de ArcGIS versión 10. Un valor negativo indica que la superficie es convexa hacia arriba en esa celda. Un perfil positivo indica que la superficie es cóncava hacia arriba. Un valor 0 indica que la superficie de esa celda es plana.

Longitud de la pendiente: fue calculado con el *software* QGIS 2.2 utilizando la función longitud de pendiente en el módulo de SAGA>Terrain Analysis>Hidrology>Slope Length; el cual tiene la característica que no acumula la longitud en las partes planas.

Índice topográfico de humedad: Este índice se calculó a través de algebra de mapas (ArcGIS *map calculator*) utilizando la siguiente función:

$$ITH = Ln\left(\frac{As}{Tan\theta}\right)$$

Dónde *As* es el área de drenaje y θ la pendiente del terreno en grados.

Índice de Posición Topográfica (IPT): se empleó la herramienta Índice de Posición Topográfica de la extensión *Land Facet Corridor Designer*², para ArcGIS versión 10, seleccionándose seis clases básicas de formas de terreno (Cuadro II—1). Valores positivos de TPI corresponden a zonas altas dentro del área circundante y son asociados a cerros y cordilleras, los valores negativos se refieren a zonas bajas dentro del área circundante, que son relacionadas a valles. Un TPI con valor a cero está asociado a regiones planas o zonas de inclinación constante cercanas a cero (Fuentes, 2009).

Cuadro II—1. Clasificación del índice de posición topográfica.

Clase		IPT
1	Valles	$\leq (-1)$
2	Pendientes bajas	$(-1) < IPT \leq (-0.5)$
3	Pendientes suaves	$(-0.5) < IPT \leq (0.5)$, pendiente $\leq (5)$ grados
4	Pendientes medias	$(-0.5) < IPT \leq (0.5)$, pendiente $> (5)$ grados
5	Pendientes altas	$(0.5) < IPT \leq (1)$
6	Cimas o crestas	$IPT > (1)$

² http://www.jennessent.com/arcgis/land_facets.htm

Distancia a estructuras volcánicas: se obtuvo a partir de los valores de IPT>50, el cual permitió identificar 45,151 cimas o crestas para la provincia fisiográfica. Para cada polígono, con TPI>50, se identificó la celda con el valor más alto de TPI y a partir de esta ubicación se calculó la distancia euclidiana con la herramienta *Spatial Analyst Tools>Distance>Euclidean Distance*.

Índice de Fournier: se obtuvo a partir de las medidas pluviométricas mensuales y anuales procedente de 670 estaciones meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional. Para el mapeo del índice se realizó una interpolación, a partir de las estaciones meteorológicas que cubre la región de estudio, utilizando el inverso de la distancia al cuadrado (IDW). El interpolador IDW, que estima la distribución espacial del índice, disminuye el peso de una estación conforme aumenta la distancia a su ubicación de referencia.

Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI):

SAVI se calculó a través de un mosaico formado por 19 imágenes Landsat ETM+, correspondientes a los meses de mayo y junio de 2013.

Análisis de la información

Para determinar la relación que existe entre el desarrollo de cárcavas y factores: edafológicos, climáticos, topográficos y vegetación, a través del software ArcGIS (versión 10) se empleó un análisis de componentes principales (ACP). El ACP se realizó a través 12 variables descriptoras del desarrollo de las cárcavas: (1) profundidad de la fase física del suelo, (2) factor de erosionabilidad de la ecuación universal de pérdida de suelo, (3) pendiente del terreno, (4) longitud de pendiente, (5) orientación de la pendiente, (6) curvatura horizontal y (7) curvatura vertical, (8) índice de posición topográfica (TPI), (9) índice topográfico de humedad (TWI), (10) distancia a estructuras volcánicas, (11) índice de Fournier y (12) índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI). El ACP permitió compactar la mayor cantidad de información, de las variables analizadas, en los primeros componentes principales. Esta característica de ACP, de compactar la mayor cantidad de información en el primer componente, se utilizó para identificar las variables que ejercen mayor influencia en el desarrollo de las cárcavas. Este análisis se realizó con el programa ArcGIS (versión 10), con la herramienta *Arctoolbox>Spatial Analyst Tools>Multivariate>Principal Components*.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez delimitada, en Google Earth Image (©2005 Digital Globe), la extensión de las 301 cárcavas visitadas a lo largo del EVM, se caracterizó de acuerdo a la información cartográfica disponible de las 14 variables que acuerdo con la bibliografía influyen en su formación y desarrollo. De este análisis resultó que la superficie media de las cárcavas visitadas es de 1.69 ha con una desviación estándar de 2.49 ha. y se presentan en un rango de altitud de 1,465 a 2,859 m, registrando la mayor presencia en altitudes de 2,600 a 2,700 msnm (24%).

El 65% de las cárcavas se presentaron en suelos de textura media (65%) y textura fina (35%), mientras que el 39% de las cárcavas se desarrollan en luvisoles y el 32% en feozem (Figura II—1). De los cuales el 28.9% corresponde a Luvisol crómico, 7% a Luvisol vértico y 3.3% a Luvisol férrico; el Feozem háptico tuvo una presencia de 16.6% y el Feozem lúvico 15.6% (Cuadro II—2). El 29% restante de las cárcavas se presentaron en: acrisol, andosol, cambisol, chernozem, litosol, planosol, regesol y vertisol. En este sentido, Bocco (1989) identificó la presencia de cárcavas en suelos con horizontes arcillosos, particularmente en luvisoles. El horizonte Bt de estos suelos se ha relacionado con procesos de retroceso de cabecera y laderas de las cárcavas y con su inicio. Por otro lado la presencia de un horizonte argílico de acumulación de arcilla del tipo Bt puede ejercer un control en el desarrollo de la cárcava, impidiendo su profundización en el perfil de suelo (Poesen *et al.*, 2003). Los luvisoles reportados por Bocco (1989) corresponden a cenizas volcánicas redepositadas, flujos de lava y lahares alterados. También, Palacio (1990) reporta la formación de cárcavas en luvisoles y andosoles.

Cuadro II—2. Distribución de cárcavas en función de unidad de suelo.

Unidad de suelo	Subunidad	Porcentaje	Unidad de suelo	Subunidad	Porcentaje
Acrisol	húmico	1.3	Litosol		2.3
	órtico	1.7			
Andosol	húmico	3.3	Luvisol	crómico	28.9
	mólico	0.3		férrico	3.3
	ócrico	1		vértico	7
Cambisol	crómico	0.3	Planosol	éutrico	1
	éutrico	3		húmico	0.3
	ferrálico	0.3	mólico	0.7	
	húmico	1			
Chernozem	lúvico	0.3	Regosol	dístrico	0.3

Unidad de suelo	Subunidad	Porcentaje
Feozem	háplico	16.6
	lúvico	15.6

Unidad de suelo	Subunidad	Porcentaje
Vertisol	éutrico	2.3
	crómico	1
	pélico	8

Las fases físicas del suelo (Figura II—2), según las unidades de suelo dominante, corresponden a suelos con fase lítica (35%), sin fase (29%) y la lítica profunda (16%), mientras que el resto se presentó en fases: dúrica, dúrica profunda, gravosa y pedregosa. Estos resultados y las observaciones de campo muestran que la presencia de cárcavas está relacionada a suelos con profundidades mayores a un metro, aunque en los sectores más erosionados de las cárcavas, por la pérdida de suelo sufrido, se encuentran afloramientos de fases dúricas, líticas, gravosas o pedregosas.

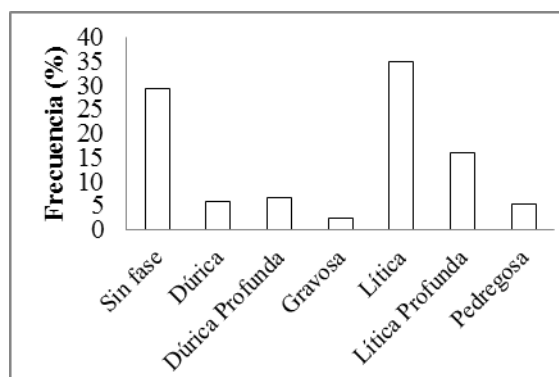
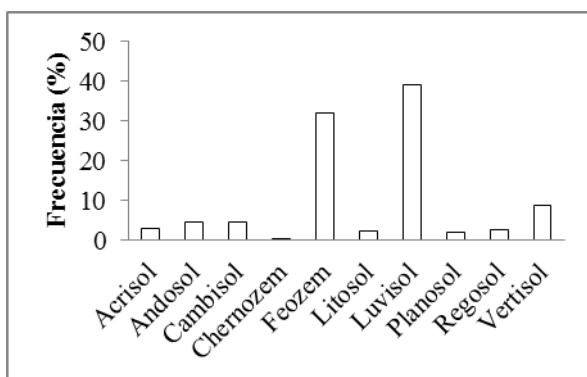


Figura II—1. Distribución de cárcavas por tipo de suelo.

Figura II—2. Distribución de cárcavas por fase física.

El 96% de la erosión en cárcavas se presentó sobre materiales volcánicos y el 4% en rocas sedimentarias, distribuyéndose mayoritariamente en basaltos (40%) y tobas ácidas (24%) y mínimamente sobre andesita, dacita, riolita, riolita-toba ácida, toba intermedia, volcanoclástico, arenisca, arenisca-conglomerado, conglomerado y aluvial (Figura II—3). De acuerdo con Palacio (1990) en el municipio de Huasca, estado de Hidalgo, el 75% de la erosión en cárcavas se desarrolló sobre basaltos, en lahares (7.6%), en andesitas (6.8%) y en traquitas (3.3%).

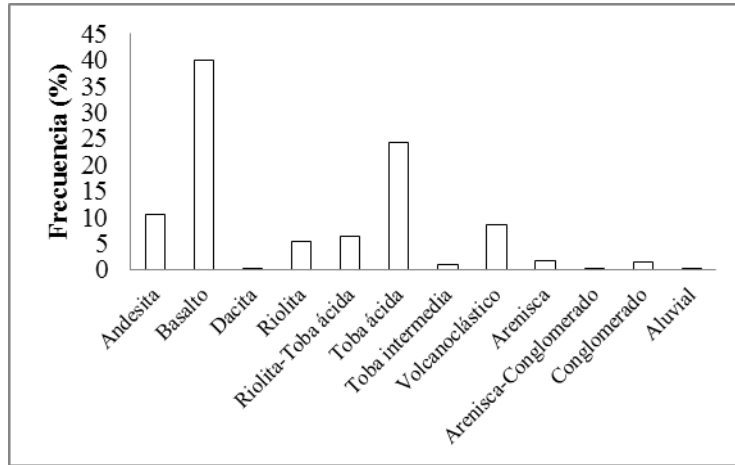


Figura II—3. Distribución de las cárcavas por tipo de roca presente.

Las pendientes promedio del terreno, dentro del perímetro de las cárcavas, se presentan entre el 2 y 28% distribuyéndose principalmente en el rango de 8 y 12% (Figura II—4). De acuerdo a un estudio realizado por Bocco (1991), en dos áreas del Sistema Volcánico Transversal, reporta que el 75% de las zonas erosionadas por cárcavas se localizaron en pendientes menores del 15% (mayoritariamente entre 8-9%); precisamente donde ocurre una ruptura de la pendiente crítica, entre unidades acumulativas y terrenos de montaña. Mientras que Palacio (1990) encuentra la más alta densidad de cárcavas en pendientes de 2-8%.

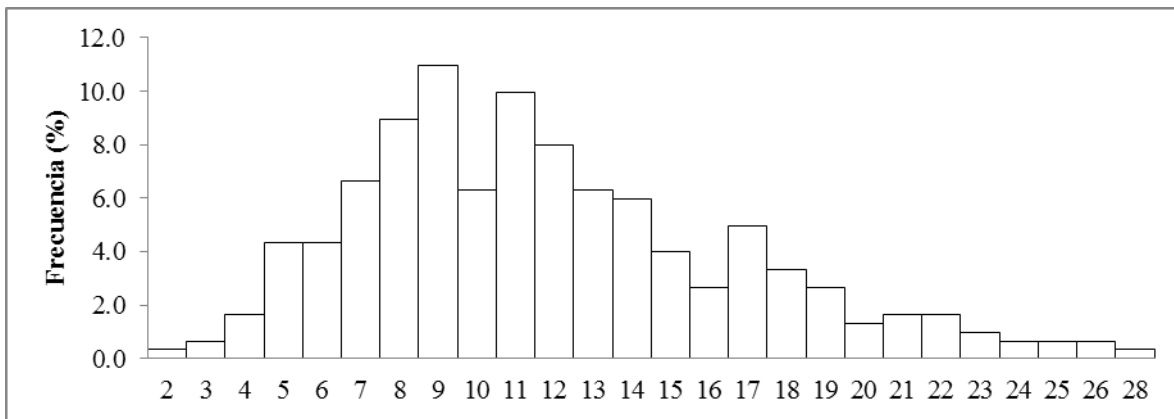


Figura II—4. Distribución de las cárcavas según la pendiente del terreno.

Las cárcavas analizadas se presentan en longitudes de pendiente entre 3 y 916 m (Figura II—5). Mayoritariamente se ubicaron en longitudes hasta 150 m (64.4%) con un máximo en el rango de 50 a 100 m (27.6%). La orientación de la pendiente (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), para las cárcavas visitadas, registra una mayor frecuencia en el

cuadrante Este-Sur (48%), en Noreste-Noroeste 33% y en el Sur-Oeste 21%. De acuerdo con Mazzola (*et al.*, 2008) en el hemisferio norte, las laderas con exposición sur reciben aproximadamente seis veces mayor radiación solar, que las de exposición norte, lo que las convierte en terrenos con mayor potencial agropecuario y de degradación.

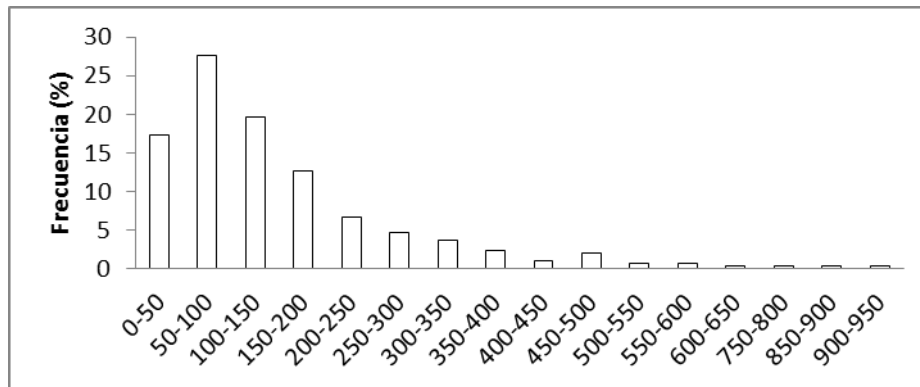


Figura II—5. Distribución de las cárcavas por rangos de longitud de pendiente (m).

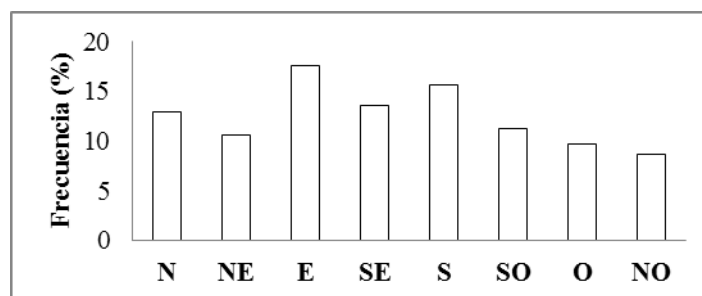


Figura II—6. Distribución de las cárcavas según la orientación de la pendiente.

La curvatura plana u horizontal es aquella que va en dirección perpendicular de la pendiente, mide la divergencia o convergencia del flujo, por lo tanto la concentración de agua. El 54% de las cárcavas se desarrollaron en terrenos convexos hacia arriba, el 38% en cóncavos hacia arriba y el 7% en planos (Figura II—7). Lo que sugiere que más de la mitad de las cárcavas está en áreas en las que el flujo es convergente. La curvatura de perfil o vertical es la curvatura de la superficie del terreno en la dirección de la pendiente y a la salida del perfil, afecta a la aceleración o deceleración del flujo de agua, e influencia la erosión y deposición de las partículas del suelo (Figura II—8). Para esta variable, el 57% de las cárcavas se ubica en terrenos convexos hacia arriba, el 42% en cóncavos hacia arriba y el 1% en planos. Lo que sugiere que más de la mitad de las cárcavas ocurren en terrenos con mayor potencial erosivo por la aceleración de los flujos concentrados.

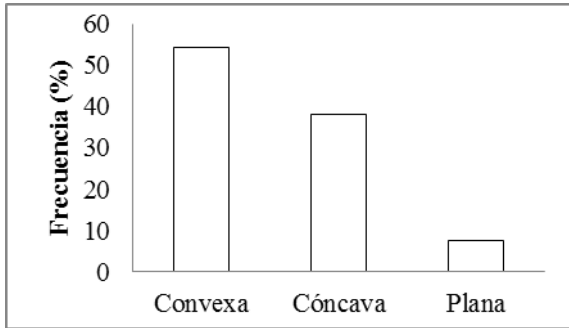


Figura II—7. Distribución de las cárcavas según la curvatura horizontal.

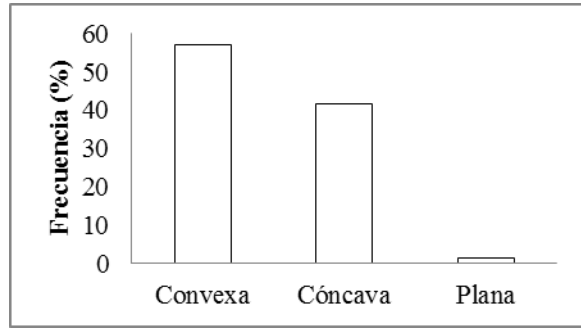


Figura II—8. Distribución de las cárcavas según la curvatura vertical.

Los valores extremos de IPT calculados oscilan entre -56.5 y 79.2, teniendo una mayor frecuencia (40%) en valores de -0.5 a 0.5 con pendiente mayor a 5° (Figura II—9). En términos generales, implica que las cárcavas analizadas se localizan fundamentalmente en ambientes de pie de monte.

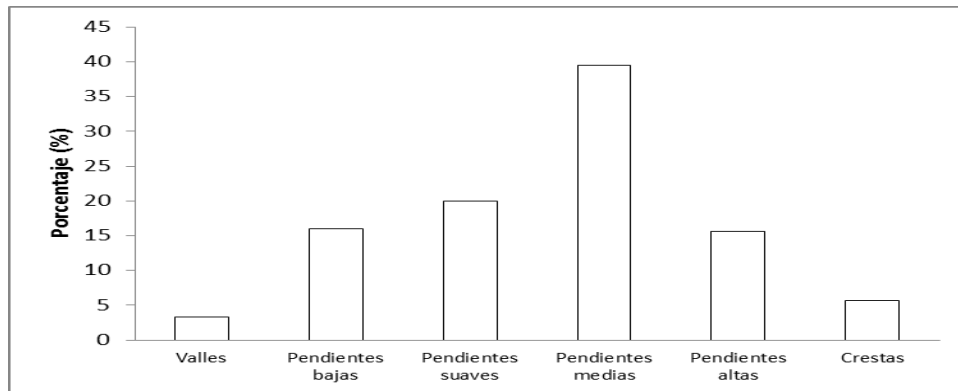


Figura II—9. Distribución de las cárcavas según su posición topográfica.

La mayor frecuencias de cárcavas se presentó en los valores de índice topográfico de humedad (TWI) de 6 a 8, registrando la mayor concentración (50%) en el valor de 7, el 24% presentó un valor de 8 y el 21% un valor de 6 (Figura II—10). El TWI está relacionado con la humedad del suelo y refleja la tendencia de éste a concentrar humedad. Los sitios con mayor valor del índice tienden a localizarse en las partes planas de las cuencas; mientras que los más bajos en las inmediaciones de los parteaguas, con pendientes elevadas y baja tendencia a generar escorrentía (Olaya, 2006); y los valores intermedio en los pies de monte. Es precisamente en estos sitios de transición donde se observó la mayor ocurrencia de cárcavas.

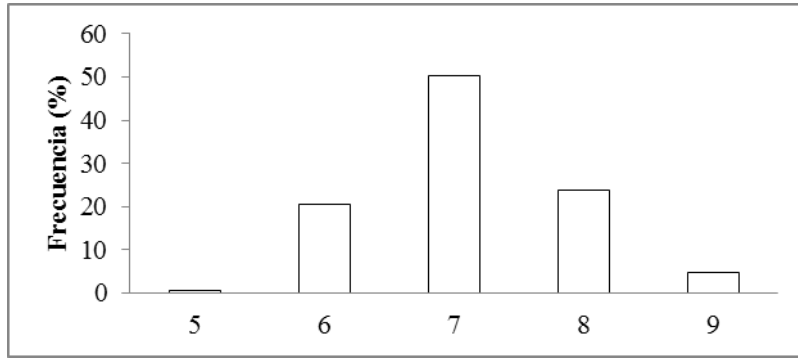


Figura II—10. Distribución de las cárcavas según su índice topográfico de humedad

Respecto a la distancia que guardan las cárcavas a las estructuras volcánicas, se encontró que a partir de los conos volcánicos el 64% de ellas se ubicaron entre los 400-1400 m; concentrándose mayoritariamente (21.4%) a una distancia de 800 a 1000 m (Figura II—11). Estos resultados indican que las cárcavas están asociadas a depósitos eólicos de cenizas volcánicas.

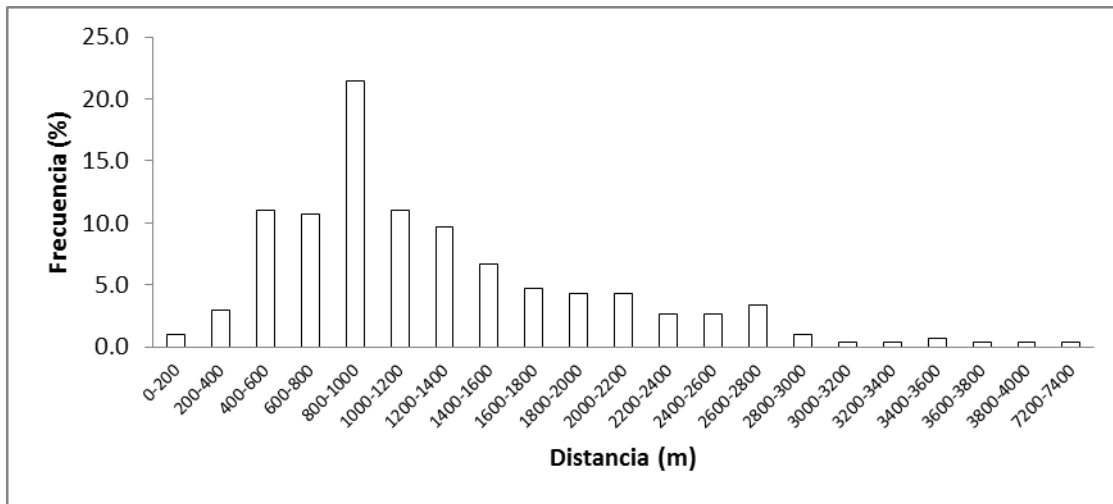


Figura II—11. Distribución de las cárcavas según su distancia a volcanes (km).

Las cárcavas ocurren fundamentalmente en áreas con índices de Fournier entre 20 y 70 mm (Figura II—12), con una mayor frecuencia (39.5%) en el rango 40-50 mm. Es decir, las cárcavas se presentan en zonas donde la precipitación tiene una agresividad muy baja (<50mm).

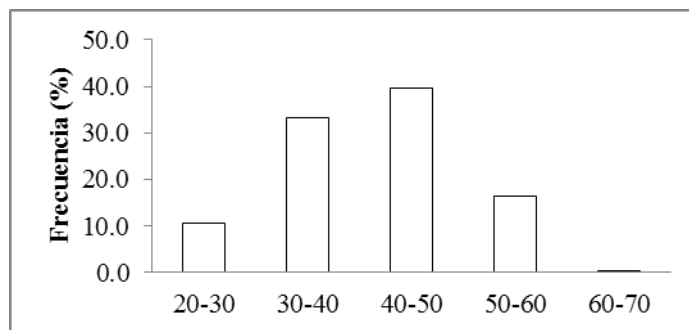


Figura II—12. Distribución de las cárcavas por rangos del Índice de Fournier (mm).

Los valores del índice de vegetación ajustada al suelo (SAVI), presentados en la Figura II—13, correspondientes a las cárcavas visitadas (Figura II—14). El índice presenta valores entre 0.03 y 0.22, registrando la mayor frecuencia en el rango de 0.10 y 0.13. El rango de SAVI se ubica entre -1.0 y 1.0, siendo los valores altos para áreas con vegetación abundante, mientras que los valores cercanos a cero o negativos representan áreas de suelo desnudo (Huete, 1988).

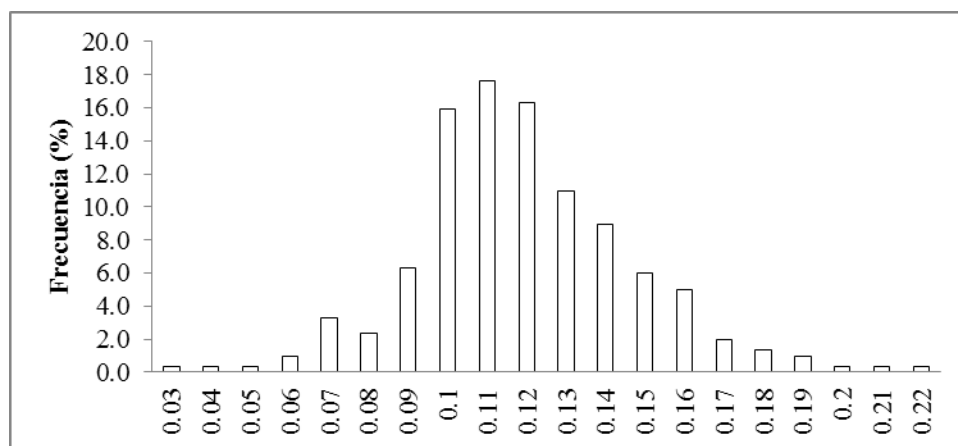
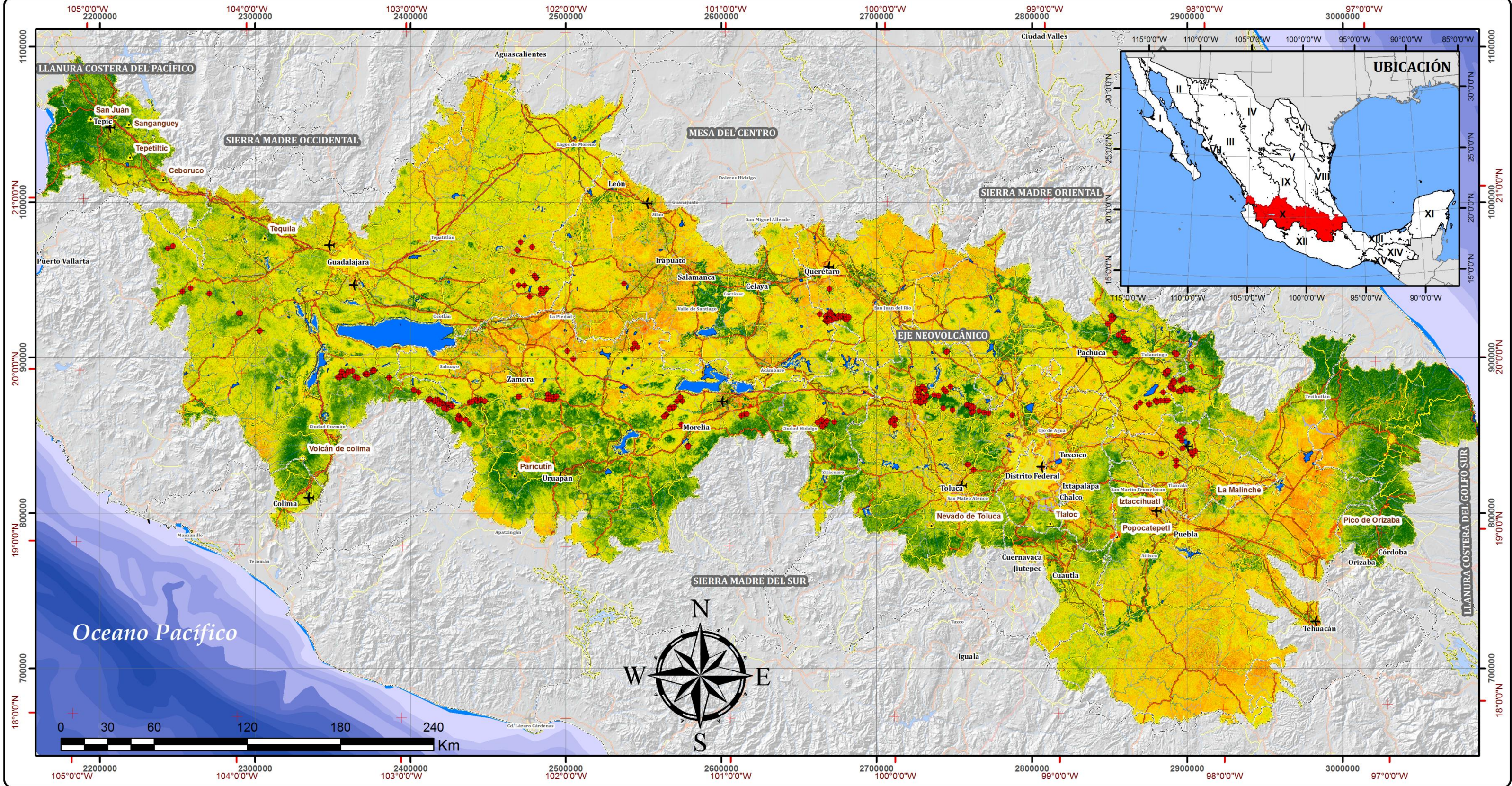


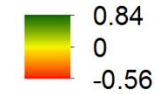
Figura II—13. Distribución de las cárcavas según valores de SAVI.



Simbología

- Límite estatal
 - Provincias fisiográficas
 - Cuerpos de agua
 - Localidad urbana
 - ✈ Aeropuerto
 - ▲ Volcanes
 - ◆ Cárcavas muestreadas
- Corrientes de agua**
- ~ Intermittente
 - Perenne

Índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI)



El SAVI disminuye las alteraciones del valor del NDVI en zonas áridas, debido a que el mismo valor de NDVI podrá a corresponder a cubiertas vigorosas pero poco densas, o a cubiertas densas pero con poca vitalidad.

Proyección Cónica Conforme de Lambert

Datum Horizontal: WGS 1984

Escala: 1:2,300,000

Fuente:

INEGI. Carta Edafológica. Escala 1:250,000. Serie I.

INEGI. Conjunto de Datos Vectoriales Fisiográficos.

Escala 1:1,000,000. Serie I

Elaboró: Biol. Paula Zamora Tirado.

COLEGIO DE POSTGRADUADOS
POSTGRADO EN EDAFOLOGÍA
TESIS DE MAESTRÍA

S A V I

ESCALA: 1:2,300,000

Figura II—14. Mapa de Índice de vegetación ajustado al suelo del Eje Volcánico Mexicano y sitios de muestreo.

Del Análisis de Componentes Principales realizado, al conjunto de variables antes descritas, resultó que la primera componente (C1) obtuvo el mayor porcentaje de la información para las 12 variables analizadas (Cuadro II—3), y representa el 95.06% de la variación total de la información. El C1 mostro la correlación existente entre áreas con erosión en cárcavas y la distancia a estructuras volcánicas, longitud de pendiente y fase física.

De acuerdo con la matriz de covarianza y correlación cruzada (Cuadro II—4) realizada, entre las 12 variables y la Componente Principal 1, la variable que obtuvo la máxima variabilidad fue la distancia a estructuras volcánicas, la cual mostró una dependencia y correlación positiva (directa), es decir a mayor distancia de las estructuras volcánicas mayor presencia de las mismas. Otras de las otras variables que tuvieron mayor peso, sobre la variabilidad, y con una relación inversa (negativa), fue la longitud de la pendiente, y con una relación directa (positiva) la fase física. La matriz de covarianza y correlación cruzada se realizó en Quantum-GIS con la herramienta de GRASS GIS (*Geographic Resources Analysis Support System*) denominada *r.covar*.

Cuadro II—3. Porcentaje de la información contenida en cada componente principal.

Componente principal	Aportación al porcentaje explicado
1	95.06
2	4.00
3	0.77

Cuadro II—4. Matriz de covarianza y correlación de la componente 1.

Variable	Valor absoluto covarianza	Valor absoluto de correlación	Signo
Distancia a estructuras volcánicas	51.7731600	1.00000	+
Longitud de pendiente	0.3819770	0.03601	-
Fase Física	0.3200816	0.15112	+
Orientación	0.0234508	0.00504	-
Índice de posición topográfica	0.0380648	0.04847	+
Índice de Fournier	0.0034793	0.00709	+
Pendiente	0.0571593	0.22610	-
Índice topográfico de humedad	0.0034015	0.05042	+
Erosionabilidad	0.0003576	0.09327	-
Curvatura de perfil	0.0001547	0.02428	-
Curvatura plana	0.0000771	0.01242	-
Índice de vegetación ajustado al suelo	0.0000924	0.04447	-

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las cárcavas se forman cerca de aparatos volcánicos en suelos producidos por la depositación de cenizas volcánicas (luvisoles) y en áreas de transición donde se produce el depósito de materiales arrastrados de las partes más altas (feozem). Esta zona de transición está asociada a pendientes medias al rededor del 8 % y topografía de tipo convexo que facilita la concentración de escurrimientos y un mayor poder de arrastre del flujo. Su presencia está asociada a un control estructural en profundidad relacionado a materiales de tipo ígneo extrusivo formado principalmente por basaltos y tobas a más de un metro de profundidad. Las cárcavas se observan principalmente en el cuadrante este-sur de las laderas de los aparatos volcánicos, es decir en los suelos con mayor incidencia de radiación solar y donde la vegetación tiene más posibilidades de estrés hídrico; generalmente en terrenos que alguna vez fueron usados en la agricultura.

Las variables distancia a estructuras volcánicas, longitud de la pendiente y fase física explican alrededor del 95.06% la presencia de cárcavas en la zona de estudio.

Para una posterior caracterización de la erosión por cárcavas, se recomienda el uso de cartas temáticas de una escala menor, las cuales permitirán la generación de información más detallada. Así como la clasificación de cárcavas por su edad geológica y forma.

LITERATURA CITADA

- Bocco G. 1989. Cartografía geomorfológica y análisis morfométrico para estudios de erosión acelerada. Estudio de caso en la Cuenca del Río Tlalpujahuá, México. Boletín del Instituto de Geografía 19:39-54. UNAM. México.
- Bocco, G., J. L. Palacio, y C. Valenzuela. 1991. Erosión en cárcavas en el Sistema Volcánico Transversal. Un modelo utilizando percepción remota, sistemas de información geográfica y análisis geomorfológico. Boletín Instituto de Geografía 22: 1.24.
- Casalí, J., J. J. López, y J. V. Giráldez. 1999. Ephemeral gully erosion in southern Navarra Spain. Catena 36: 65-84.

- Demant A. 1978. Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación. *Revista Instituto de Geología* 2:172-187.
- Ferrusquía Villafranca, I. 1993. Geología de México: Una sinopsis. En: Ramamoorthy T.P., R. Bye, A. Lot y J. Fa (eds.). *Diversidad biológica de México: Orígenes y distribución*. Instituto de Biología, UNAM., México D. F., pp. 3-108.
- Figuroa S. B., A. Amante, H. G. Cortés, J. Pimentel, E. S. Osuna, J. M. Rodríguez y J. F. Morales. 1991. *Manual de predicción de pérdidas de suelo por erosión*. Secretaría de Agricultura y de Recursos Hidráulicos. Colegio de Postgraduados. México.
- Fuentes-Soto, A. y O. Martínez-Oropesa. 2001. *Manual técnico de estabilización y forestación de cárcavas en cuencas hidrográficas*. Agencia de Información y Comunicación para la Agricultura. Cuba.
- Fuentes-Delgado J. E. 2009. *Aplicación de la geomorfometría para la definición de unidades fisiográficas de paisaje en una zona piloto del Parque Nacional Natural Puracé*. Tesis Maestría. Universidad Mayor de San Simón. Gómez-Gutiérrez, Á.; S. Schnabel, y F. Lavado Contador. 2011. Procesos, factores y consecuencias de la erosión por cárcavas; trabajos desarrollados en la Península Ibérica. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles* 55: 59-80.
- Gómez-Tuena, A., M. T. Orozco-Esquivel y L. Ferraro. 2005. Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana. *Boletín de la sociedad geológica mexicana* 3: 227-283. México.
- Gómez-Tuena, A., A. Lagatta, C. Langmuir, S. Goldstein, F. Ortega Gutiérrez and G. Carrasco Nuñez. 2003. Temporal control of subduction magmatism in the Eastern Trans-Mexican Volcanic Belt: mantle sources, slab contributions and cristal contamination: *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 4(8).
- Huete, A. R. 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment* 25: 295–309.
- INEGI. 1998. *Conjunto de Datos Vectoriales Edafológicos*. Continuo Nacional. Escala 1: 250 000. Serie I. México. www.inegi.org.mx.
- INEGI. 2002. *Conjunto de Datos Vectoriales Geológicos*. Continuo Nacional. Escala 1: 250 000. Serie I. México. www.inegi.org.mx.
- INEGI. 2007. *Conjunto de Datos Vectoriales Uso del Suelo y Vegetación*. Continuo Nacional. Escala 1:250 000. Serie IV. México. www.inegi.org.mx.
- INEGI. 2010. *Censo de Población y Vivienda*. www.inegi.org.mx.

- INEGI. 2013. Áreas Geoestadísticas Estatales del Marco Geoestadístico Nacional del Instituto nacional de Estadística y geografía. Escala 1: 250 000. www.inegi.org.mx.
- Mazzola M. B., A.G., Kin, E. F. Morici, F.J. Babinec y G. Tamborini. 2008. Efecto del gradiente altitudinal sobre la vegetación de las sierras Lihue Calel (La Pama, Argentina). *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica* 43:103-119.
- Medina-Chena A., T. E. Salazar-Chimal y J. L. Álvarez-Palacio. 2010. Fisiografía y suelos, en E. Florescano y J. Ortiz Escamilla (coordinadores). *Atlas del Patrimonio Natural, Histórico y Cultural de Veracruz Tomo 1 Patrimonio Natural. 1ª Edición. México, D. F.* 280 p.
- Morrone J.J. y J. Márquez. 2003. Aproximación a un atlas biogeográfico mexicano: componentes bióticos principales y provincias biogeográficas. En: Morrone J. J. y Llorente-Bousquets J. Eds. *Una Perspectiva Latinoamericana de la Biogeografía*, pp. 217-220. Las Prensas de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F.
- Morrone J.J. 2005. Hacia una síntesis biogeográfica de México. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 76:207-252.
- Morrone J.J. 2006. Biogeographic areas and transition zones of Latin America and the Caribbean Islands based on panbiogeographic and cladistic analyses of the Entomofauna. *Annual Review of Entomology* 51:467-494.
- Olaya, V. 2006. Fundamentos de Análisis Geográfico con SEXTANTES (en línea). Consultado el 15/05/2013. Disponible en: <http://campusvirtual.unex.es/cala/cala/course/view.php?id=146>
- Palacio-Prieto, J. L. 1990. Determinación de áreas de erosión potencial en cárcavas: Un ejemplo en el centro de México. *Investigaciones geográficas Boletín Instituto de geografía* 21: 45-55. UNAM, México.
- Poesen, J., J. Nachtergaele, G. Verstraeten y C. Valentin. 2003. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. *Catena* 50: 91-133.
- Romero, F.J. y A. Velázquez. 1999. La región de montaña del sur de la Cuenca de México: una revisión de su importancia biológica. En: Velázquez A. y F. J. Romero (eds.). *Biodiversidad de la región de montaña del sur de la Cuenca de México: bases para el ordenamiento ecológico. UAM-X-SEMARNAP*, Pp. 40-51.

Sámamo-Tirado, A. P. 2009. Degradación del suelo causado por cárcavas en la cuenca del río Sonora. Boletín de la red sísmica del noreste de México 1: 862-867. Ensenada, B. C., México.

Valcárcel, M., M.T. Taboada, Paz, A., y J. Dafonte, 2003. Ephemeral gully erosion in northwestern Spain. Catena 50: 199-216.

CAPITULO III: DETERMINACIÓN DE ÁREAS AFECTADAS Y SUSCEPTIBLES A LA FORMACIÓN DE CÁRCAVAS: EJE NEOVOLCÁNICO MEXICANO

Paula Erika Zamora-Tirado¹, Demetrio Salvador Fernández-Reynoso^{1‡}, Mario Roberto Martínez-Menez¹, Lenom Cajuste- Bontemps¹

RESUMEN

En el Eje Neovolcánico Mexicano (EVM) los problemas de erosión en cárcavas constituyen unos de los principales problemas medioambientales y socioeconómicos que afectan la región. Es por esto, que los estudios que permitan identificar áreas degradadas por erosión en cárcavas o susceptibles a su formación, pueden ser de gran ayuda para los tomadores de decisiones sobre el uso y manejo de estas tierras. Para la identificación de áreas afectadas y propensas a la formación de cárcavas, en este trabajo se utilizó una metodología apoyada en una clasificación supervisada, por el método de máxima verosimilitud, en base a un conjunto de datos ambientales basados en cartografía digital, imágenes de satélite, SIG y trabajo de campo.

La información utilizada para la identificación de cárcavas fue: profundidad de la fase física del suelo, factor de erosionabilidad de la ecuación universal de pérdida de suelo, pendiente del terreno, longitud de pendiente, orientación de la pendiente, curvatura horizontal y vertical, índice de posición topográfica, índice topográfico de humedad (TWI), índice de Fournier, índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) y distancia a estructuras volcánicas.

La evaluación de los resultados, a partir de 1,000 puntos aleatorios, permitió establecer un 52.7% de confiabilidad de predicción de cárcavas. De la distribución espacial de las cárcavas obtenidas, se deduce que el EVM presenta importantes problemas de erosión por cárcavas, con una superficie de 1'079,975 ha (6.7% de la superficie del EVM) que abarcan 62 DDR (Distritos de Desarrollo rural de la SAGARPA).

¹ Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. 56230 Montecillo, Estado de México.

[‡] Autor responsable (demetrio@colpos.mx).

Palabras clave: *erosión en cárcavas, modelación cárcavas, análisis de máxima verosimilitud, eje neovolcánico mexicano.*

SUMMARY

In the Trans-mexican Volcanic Belt (EVM) gully erosion problem is a major environmental and socio-economic issue. For this reason, studies that help to identify areas degraded by gully erosion or susceptible for its formation are useful for decision-making on soil's conservation management. In this work, the areas affected and susceptible to gully erosion were identified using a supervised classification. It was used the maximum likelihood method and a set of environmental data based on digital mapping, satellite imagery, GIS and fieldwork.

The information used for gully identification was: soil depth, soil erodibility (USLE's K factor), land slope, slope length, aspect, horizontal and vertical curvature, topographic position index (TPI), topographic wetness index (TWI), Fournier Index, Vegetation Index (SAVI) and distance to volcanic structures.

The evaluation of results was based on 1,000 random points and it showed a 52.7% of reliability on predicted gullies. It is concluded, that the EVM has gully's erosion problems in 1'079, 975 ha (6.7% of EVM's surface) and it cover 62 DDR (Mexico's rural administrative and development districts).

Index words: *gully erosion, gully modeling, maximum likelihood analysis, trans-mexican volcanic belt.*

INTRODUCCIÓN

La erosión de suelos es uno de los principales problemas medioambientales que afecta la provincia fisiográfica del Eje Neovolcánico Mexicano. Esta degradación del suelo ha repercutido biológica, social y económicamente en la región, principalmente cuando la erosión se manifiesta en forma de cárcavas, generalmente ocasionada por actividades antrópicas. La pérdida de suelo por este tipo de erosión, puede referirse hasta un 80% del total de pérdidas ocasionadas por diversos procesos de erosión hídrica (Poesen *et al.*, 1996).

En esta provincia, se localizan áreas, en las que los problemas de erosión por cárcavas presentan niveles muy desarrollados (Bocco, 1989), causando que los suelos se encuentren desnudos la mayor parte del año, y de esta forma se favorece el arrastre de partículas superficiales por las aguas de escorrentía.

La cartografía digital y las imágenes de satélite son una herramienta de gran utilidad para el desarrollo de estudios de suelos, vegetación, litología, geomorfología, etc. En este trabajo se propone una metodología de uso conjunto de cartografía digital, imágenes de sensores remotos, sistemas de información geográfica (SIG) y datos de campo, a través de una clasificación supervisada por el algoritmo de máxima verosimilitud, con el objetivo de identificar áreas afectadas por la formación de cárcavas y susceptibles a su formación.

Con el propósito de frenar o mitigar el avance de la erosión por cárcavas, la información generada es de gran ayuda para adoptar medidas de planificación necesarias, correcta gestión y ordenamiento territorial en dicha área.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio corresponde a la provincia fisiográfica Eje Neovolcánico Mexicano, la cual cubre una superficie de 16'069,318 hectáreas. El EVM se enmarca entre los estados mexicanos de: Aguascalientes, Colima, Distrito Federal, Guanajuato, Guerrero, Hidalgo, Jalisco, Estado de México, Michoacán, Morelos, Nayarit, Oaxaca, Puebla, Querétaro, Tlaxcala, Veracruz y Zacatecas (INEGI, 2013). Su relieve varía desde el nivel de mar hasta una cota de 5,608 msnm, tiene una anchura que varía entre los 80 y 230 km, y un desarrollo longitudinal de 1,000 km (Gómez-Tuena *et al.*, 2003).

El EVM está formado por aproximadamente 8,000 volcanes (Demant, 1978; Gómez-Truena *et al.*, 2005), sierras volcánicas, grandes coladas de lava, depósitos de ceniza, cuencas cerradas ocupadas por lagos y estructuras de calderas volcánicas (Medina *et al.*, 2010). La composición de las rocas que conforman el EVM es muy diversa, de acuerdo con INEGI (2002), se registran 68 tipos de rocas pertenecientes a las clases: ígnea extrusiva e intrusiva, sedimentaria y metamórfica. Los suelos dominantes son: feozem, andosol, vertisol, cambisol, litosol, luvisol, y regosol (INEGI, 1998). La vegetación dominante es: selva baja caducifolia, pastizal inducido, bosque de encino, bosque de pino y bosque de

pino-encino (INEGI, 2007). La agricultura de temporal y la agricultura de riego son las principales actividades productivas. La gran diversidad biótica y abiótica que existe en el EVM ha permitido el establecimiento de asentamientos humanos por más de 2,500 años (Romero y Velázquez, 1999). Actualmente el 49.8% de la población de México vive en esta provincia (Gómez-Tuena *et al.*, 2005; INEGI, 2010) y la superficie de agricultura de temporal y riego representan el 52.5% y 47.5% respectivamente de la superficie nacional.

Obtención de la información

La identificación de áreas susceptibles a la formación de cárcavas se basó en una base de datos, a través de ArcGIS versión 10, como se muestra en la Figura III—1. El análisis se realizó con base en información de campo, cartografía temática, modelo digital de elevación, imágenes satelitales y datos de precipitación.

La información de campo se obtuvo de un muestreo realizado en varias entidades federativas a lo largo del área de estudio en áreas afectadas por la erosión en cárcavas. Con fines de clasificación, se asumieron las cárcavas como de un solo tipo o clase. En campo se visitaron 301 cárcavas (Anexo, 3), que fueron georreferenciadas (GPS con precisión $\pm 5\text{m}$) y posteriormente en gabinete, usando Google Earth Image ($\text{\textcircled{R}}2005$ Digital Globe), se capturaron los límites de cada cárcava. El color del suelo y la escasa cobertura vegetal, asociados a la erosión en cárcavas, facilitó la identificación de los límites del área degradada.

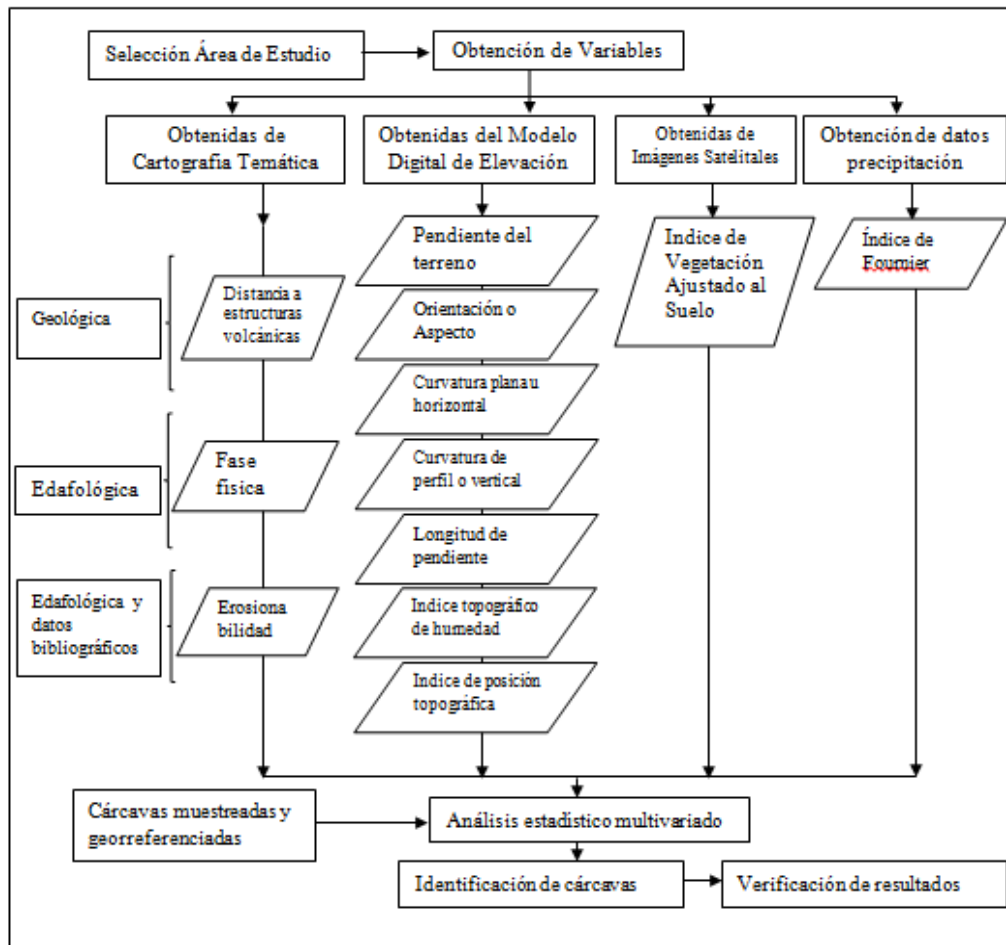


Figura III—1. Desarrollo Metodológico.

Las variables ambientales, asociadas a la formación de cárcavas, analizadas fueron (Cuadro III—1): profundidad de la fase física del suelo, factor de erosionabilidad de la ecuación universal de pérdidas de suelo, pendiente del terreno, longitud de pendiente del terreno, orientación, curvatura horizontal y vertical, índice de posición topográfica (TPI), índice topográfico de humedad (TWI), distancia a estructuras volcánicas, índice de Fournier e índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI). Los mapas elaborados, para los diferentes parámetros de entrada y resultados obtenidos, se generaron con una resolución espacial de 30 x 30 m, una proyección Cónica Conforme de Lambert, y un datum horizontal WGS 1984.

Cuadro III—1. Variables ambientales asociadas a la formación de cárcavas.

Variab les	Parámetro	Origen	Característica
Edáficas	Profundidad (Fase física)	CD	Revela la distribución vertical de diferentes capas u horizontes del suelo.
	Erosionabilidad (K)	T	Estima por tipo de suelo la resistencia de las partículas del suelo para ser desprendidas por los agentes erosivos.
Topográficas	Pendiente	MDE	Influye en la velocidad de flujo, transporte de sedimentos, contenido de humedad en el suelo y profundidad del suelo.
	Longitud de pendiente	MDE	Indicador de la acumulación del escurrimiento superficial.
	Orientación o Aspecto	MDE	Determina la dirección de flujo, la evapotranspiración y el tipo de cobertura vegetal.
	Curvatura plana u horizontal	MDE	Identifica donde convergen y divergen los flujos y los contenido de agua en el suelo.
	Curvatura de perfil o vertical	MDE	Indicador de la razón de cambio de la aceleración de un flujo que favorece la remoción o sedimentación de las partículas de suelo.
	Índice de posición topográfica	MDE	Caracteriza la topografía local (geoformas) con relación a su contexto espacial o la posición relativa del terreno
	Índice Topográfico de Humedad	MDE	Indicador del contenido de humedad del suelo y de las superficies de saturación.
Geológicas	Distancia a aparatos volcánicos	CD	Indicador de la distancia de deposición de los flujos piroclásticos.
Climática	Índice de Fournier	BD	Indicador del poder erosivo de las precipitaciones que ocurren en un lugar.
Vegetación	Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI)	IS	Revela el grado de protección de un suelo contra los agentes erosivos.

Nota: CD (Cartografía Digital, T (Tablas), MDE (Modelo Digital de Elevación). BD (Bases de Datos), IS (Imágenes de Satélite).

Las variables ambientales indicadas en Cuadro III—1 se obtuvieron de la siguiente forma:

Profundidad del suelo: se obtuvo a partir de la fase del suelo que reporta, para cada tipo de suelo, el Conjunto de Datos Vectorial Edafológico (continuo nacional), serie II, escala 1:250,000 de INEGI (1998).

Erosionabilidad (K): se obtuvo en base al tipo de suelo (INEGI, 1998) y su textura; según los valores generados por la FAO en 1970 (Figuroa *et al.* 1991).

Pendientes del terreno: se obtuvo a partir del modelo digital de elevaciones, se utilizó la herramienta *Spatial Analyst Tools>Surface>Slope* de ArcGIS versión 10. Los valores de pendiente se calcularon en porcentaje.

Orientación o Aspecto: el cálculo se llevó a cabo con la herramienta *Spatial Analyst Tools>Surface>Aspect* de ArcGIS versión 10. Sus valores se miden en grados desde 0° a

360°. Las orientaciones Norte tienen valores entre 315° y 360° y entre 0° y 45°, las Sur entre 135° y 225°, las Este y Oeste entre 45° a 135° y 225° a 315°, respectivamente. Las áreas planas que no tienen dirección de pendiente les corresponde un valor de -1.

Curvatura Plana u Horizontal: se realizó con la herramienta *Spatial Analyst Tools>Surface>Curvature>out_plan_curve _raster* de ArcGIS versión 10. Un valor positivo indica que la superficie es convexa hacia arriba, en esa celda. Un plano negativo indica que la superficie es cóncava, hacia arriba. Un valor 0 indica que la superficie es plana en esa celda.

Curvatura de Perfil o Vertical: se realizó con la herramienta *Spatial Analyst Tools>Surface>Curvature>out_profile_curve_raster* de ArcGIS versión 10. Un valor negativo indica que la superficie es convexa hacia arriba en esa celda. Un perfil positivo indica que la superficie es cóncava hacia arriba. Un valor 0 indica que la superficie es plana en esa celda.

Longitud de la pendiente: fue calculado con el software QGIS 2.2 utilizando la función longitud de pendiente en el módulo de SAGA>Terrain Analysis>Hidrology>Slope Length; el cual tiene la característica que no acumula la longitud en las partes planas.

Índice topográfico de humedad: Este índice se calculó a través de álgebra de mapas (*ArcGIS map calculator*) utilizando la siguiente función:

$$ITH = \ln\left(\frac{As}{\tan \theta}\right)$$

Dónde *As* es el área de drenaje y θ la pendiente del terreno en grados.

Índice de Posición Topográfica (IPT): se empleó la herramienta Índice de Posición Topográfica de la extensión *Land Facet Corridor Designer* (Jenness *et al.*, 2013), seleccionándose seis clases básicas de formas de terreno (Cuadro III—2). Valores positivos de TPI corresponden a zonas altas dentro del área circundante y son asociados a cerros y cordilleras, los valores negativos se refieren a zonas bajas dentro del área circundante, que son relacionadas a valles. Un TPI con valor a cero está asociado a regiones planas o zonas de inclinación constante cercanas a cero (Fuentes, 2009).

Cuadro III—2. Clasificación del índice de posición topográfica.

Clase		IPT
1	Valles	$\leq (-1)$
2	Pendientes bajas	$(-1) < IPT \leq (-0.5)$
3	Pendientes suaves	$(-0.5) < IPT \leq (0.5)$, pendiente $\leq (5)$ grados
4	Pendientes medias	$(-0.5) < IPT \leq (0.5)$, pendiente $> (5)$ grados
5	Pendientes altas	$(0.5) < IPT \leq (1)$
6	Cimas o crestas	$IPT > (1)$

Distancia a estructuras volcánicas: se obtuvo a partir de los valores de $IPT > 50$, el cual permitió identificar 45,151 cimas o crestas para la provincia fisiográfica. Para cada polígono, con $TPI > 50$, se identificó la celda con el valor más alto de TPI y a partir de esta ubicación se calculó la distancia euclidiana con la herramienta *Spatial Analyst Tools > Distance > Euclidean Distance*.

Mapa de Índice de Fournier: se obtuvo a partir de las medidas pluviométricas mensuales y anuales procedente de 670 estaciones meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional. Para el mapeo de la distribución espacial del índice se realizó una interpolación, utilizando el inverso de la distancia al cuadrado (IDW), para las estaciones meteorológicas que cubre la región de estudio. El interpolador IDW, que estima la distribución espacial del índice, disminuye el peso de una estación conforme aumenta la distancia a su ubicación de referencia.

Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI): El índice SAVI se calculó a través de un mosaico formado por 19 imágenes Landsat ETM+, correspondientes a los meses de mayo y junio de 2013.

Análisis de la información

Con el fin de determinar las áreas afectadas y susceptibles a procesos de erosión por cárcavas en la provincia fisiográfica Eje Neovolcánico Mexicano, se realizó una clasificación digital supervisada con el software ARCMAP (10), a través del algoritmo de máxima verosimilitud o máxima probabilidad, para lo cual se utilizó la siguiente herramienta: *ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Multivariate > Maximum Likelihood Classification*. Este método se seleccionó por ser un procedimiento que requiere de un conocimiento general del área de estudio y porque permite la interacción de los polígonos seleccionados en campo con un conjunto de capas de información, relacionadas con el fenómeno de estudio. Así, el algoritmo permite identificar áreas, afuera de los polígonos

identificados en campo, con posibilidades de replicar las condiciones que presentan los campos de entrenamiento; en este caso, polígonos con formación de cárcavas.

Cuando se realiza una clasificación de máxima verosimilitud, se produce una imagen con 14 niveles confianza. Los primeros niveles les corresponden las mayores certezas o confianzas (Cuadro III—3). Para el presente trabajo, el mapa de áreas afectadas o susceptibles a la formación de cárcavas se construyó con los primeros siete niveles de confianza.

Cuadro III—3. Niveles de confianza de la clasificación de máxima verosimilitud.

Valor	Probabilidad de ser correcto (%)
1	0.995
2	0.99
3	0.975
4	0.95
5	0.9
6	0.75
7	0.5
8	0.25
9	0.1
10	0.05
11	0.025
12	0.01
13	0.005
14	0.0

Evaluación de resultados

La estimación de la exactitud del mapa obtenido, se evaluó a partir de la creación de 1,000 puntos aleatorios, a través de la herramienta *ArcToolbox > Data Management Tools > Feature Class > Create Random Points*. Posteriormente a cada punto aleatorio se le realizó un *Buffer*, con la herramienta *ArcToolbox > Analysis Tools > Proximity > Buffer*, de 250 y 500 m de radio. Esta última herramienta generó un vector circular el cual se convirtió a formato KML (*ArcToolbox > Conversion Tools > To KML > Layer To KML*) para verificar en Google Earth Image (©2005 Digital Globe) la presencia o ausencia de cárcavas.

En el proceso de verificación, de cada círculo, se registró la presencia o ausencia de cárcavas y el porcentaje de superficie erosionada, en cuatro clases, según el porcentaje

visual observado. La clase 1 corresponde a una ocupación < 25% de la superficie, la clase 2: <50%, clase 3: <75% y la clase 4: 100%.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como resultado del método propuesto, en la Figura III—3 se muestra el mapa con las áreas, con probabilidad superior a 50%, susceptibles a la formación de cárcavas. Este porcentaje de susceptibilidad le corresponde una superficie de 1'079,975 ha, equivalente al 6.7% de la superficie del EVM. En el Cuadro III—4 se muestra la superficie propensa a la formación de cárcavas para diferentes niveles de susceptibilidad.

Cuadro III—4 Susceptibilidad a la formación de cárcavas y superficie afectada.

Valor	Susceptibilidad a cárcavas (%)	Celdas clasificadas	Superficie (ha)
1	0.995	13176	1,186
2	0.99	23000	2,070
3	0.975	101097	9,099
4	0.95	236424	21,278
5	0.9	662299	59,607
6	0.75	3038719	273,485
7	0.5	8409231	756,831
8	0.25	14316309	1,288,468
9	0.1	15809845	1,422,886
10	0.05	8939485	804,554
11	0.025	7363225	662,690
12	0.01	7694173	692,476
13	0.005	4973040	447,574
14	0.0	106791095	9,611,199

Durante la validación del mapa de áreas afectadas y susceptibles a la formación de cárcavas, se obtuvo la presencia de este tipo de erosión en un 52.7%, para radios de 500m, y 37.4% en radios de 250m. Sin embargo, se registraron puntos de verificación en los que no se observaron cárcavas, pero en superficies aledañas sí. Lo anterior también obedece a que en los círculos monitoreados se llevan a cabo prácticas de conservación de suelo (terrazas), las cuales previenen la formación de cárcavas. También a la presencia de cárcavas efímeras, las cuales son eliminadas con las herramientas de laboreo agrícola.

Para las cuatro clases, referentes a la superficie ocupada por cárcavas, y los dos radios estudiados, las cárcavas se presentaron principalmente en la clase 1 (82 y 87%

respectivamente) (Cuadro III—5). En la Figura III—4 se muestran algunos ejemplos de la erosión observada.

Cuadro III—5. Porcentaje de puntos de verificación.

Clases Erosión	Superficie ocupación	Radio 250 m (%)	Radio 500 m (%)
1	< 25%	82	84
2	<50%	11	13
3	<75%	6	3
4	100%.	0	0

Todos los puntos de verificación observados para ambos radios corresponden a la era Cenozoica, la que inició hace unos 65 millones de años y se extiende hasta la actualidad. Los tres sistemas geológicos, durante el cenozoico, que registraron los sitios de verificación con mayor presencia de cárcavas fueron: cuaternario (actualidad a 1.81 millones de años), neógeno (1.81-5.32 ma) y terciario (23.8-65 ma) con valores de 35%, 40% y 38%, respectivamente para radios de 250m y 47%, 59% y 64% para radios de 500m (Ver Figura III—2). Estos datos nos indican que una mayor presencia de cárcavas, que ocurren dentro del EVM, están relacionadas a una mayor edad geológica.

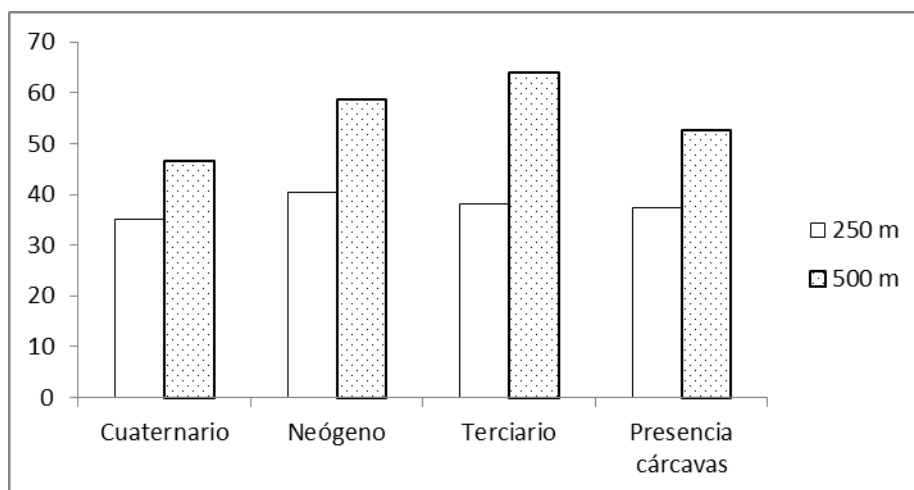
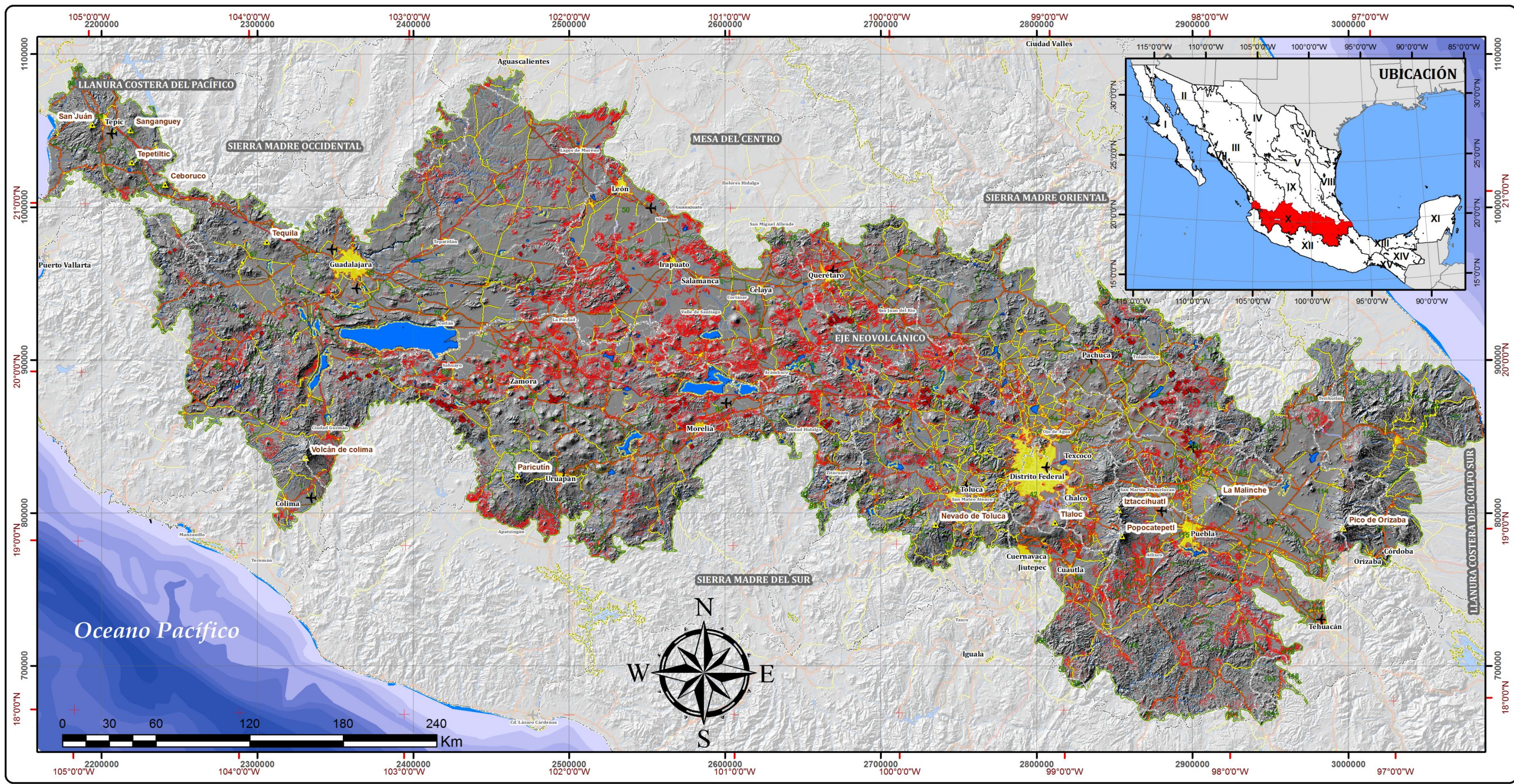


Figura III—2. Porcentaje de sistemas geológicos con presencia de cárcavas, en los sitios de verificación para un 50% de susceptibilidad.-



Simbología

- Límite estatal
- Distrito de Desarrollo Rural
- Provincias fisiográficas
- Aeropuerto
- Volcanes
- Cuerpos de agua
- Localidad urbana
- Corrientes de agua**
- Intermitente
- Perenne

Áreas susceptibles a la formación de cárcavas

- Cárcavas muestreadas
- Áreas con mayor probabilidad

Áreas susceptibles a la formación de cárcavas. Se generó a partir de una clasificación supervisada por máxima verosimilitud, utilizando las áreas de cárcavas como campos de entrenamiento, a partir de variables que intervienen en el proceso de formación de cárcavas.

Proyección Cónica Conforme de Lambert
Datum Horizontal: WGS 1984

Escala: 1:2,300,000

Fuente:

INEGI. Marco Geoestadístico Nacional

INEGI. Conjunto de Datos Vectoriales Fisiográficos.

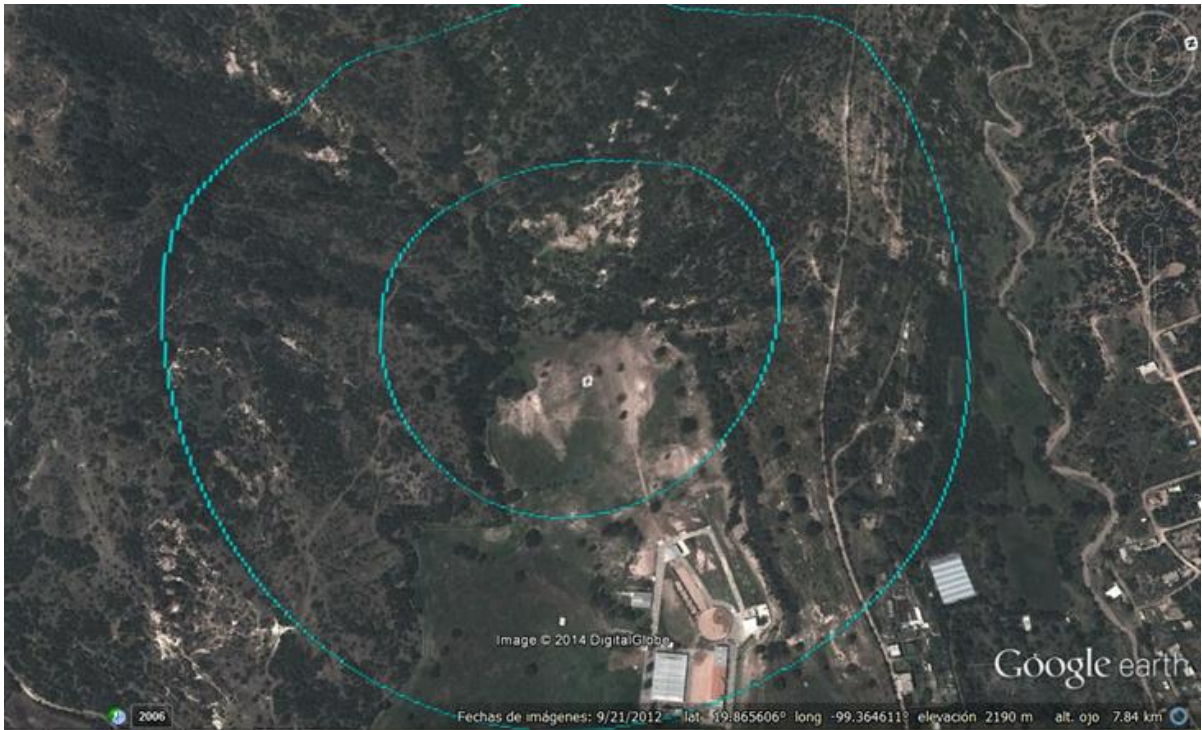
Escala 1:1,000,000. Serie I

Elaboró: Biol. Paula Zamora Tirado.

COLEGIO DE POSTGRADUADOS
 POSTGRADO EN EDAFOLOGÍA
 TESIS DE MAESTRÍA

SUSCEPTIBILIDAD DE FORMACIÓN DE CÁRCAVAS
ESCALA: 1:2,300,000

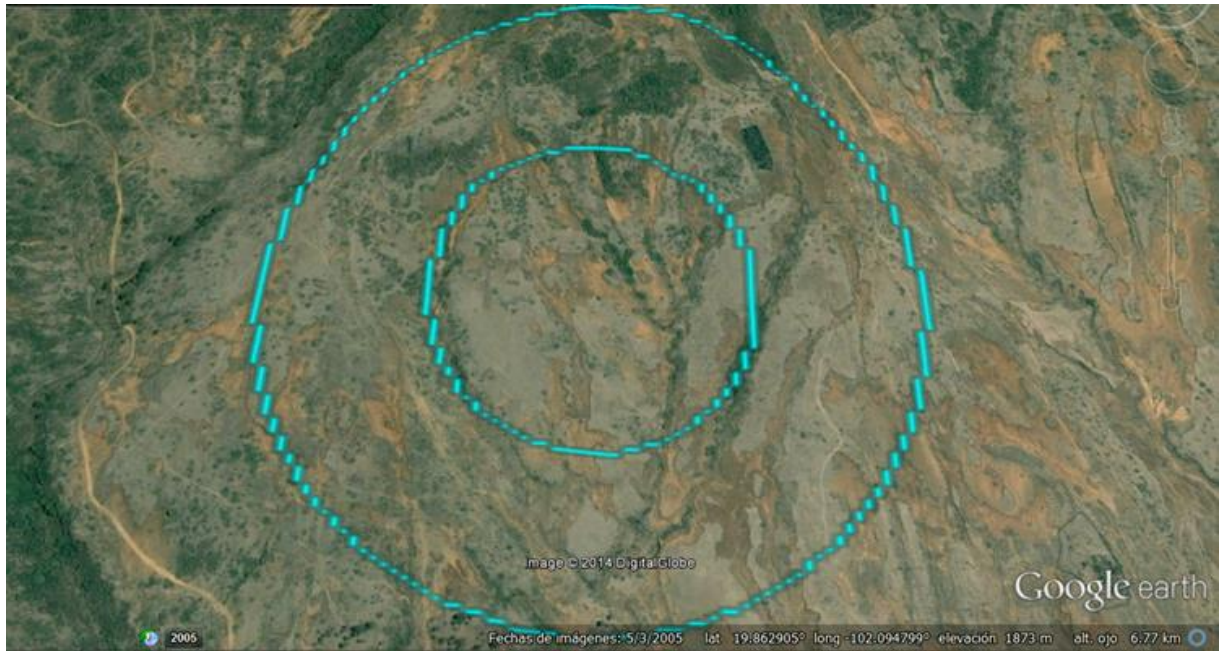
Figura III—3. Áreas susceptibles a la formación de cárcavas en el Eje Volcánico Mexicano.



Clase 1 (< 25%)



Clase 2 (< 50%)



Clase 3 (< 75%)

Figura III—4. Ejemplos de puntos de verificación, por clase de degradación, de la presencia de cárcavas.

A fin de obtener datos sobre los niveles de degradación, por erosión en cárcavas, útiles a los tomadores de decisiones, se procesó la superficie que ocupan las áreas afectadas y susceptibles a la formación de cárcavas para los DDR⁴ de la SAGARPA que ocupan el EVM.

El área con posibilidades de estar afectada por erosión en cárcavas, ocupa 62 DDR (Cuadro III—7); de los cuales 10 cubren el 52% de la superficie afectada en el EVM (Cuadro III—6) y son: Cortázar, La Piedad, Izúcar de Matamoros, Cholula, Lagos de Moreno, León, Tecamachalco, Celaya, Zitácuaro y Morelia.

Cuadro III—6. Principales Distritos de Desarrollo Rural que pertenecen a zonas afectadas por la erosión en cárcavas, en el Eje Neovolcánico Mexicano.

Núm.	DDR	Entidad Federativa	Sup. total DDR (ha)	Sup. DDR de áreas afectadas por cárcavas (ha)	Áreas afectadas por cárcavas respecto al DDR (%)	Cárcavas del DDR respecto a la superficie total de afectación (%)
1	Cortázar	Guanajuato	824,178	125,898	15.28	12.7
2	La Piedad	Michoacán	448,742	69,286	15.44	7.0
3	Izúcar de Matamoros	Puebla	868,287	48,826	5.62	4.9
4	Cholula	Puebla	419,851	41,299	9.84	4.2
5	Lagos de Moreno	Jalisco	1,472,680	40,613	2.76	4.1
6	León	Guanajuato	470,820	40,279	8.56	4.1
7	Tecamachalco	Puebla	433,250	39,850	9.20	4.0
8	Celaya	Guanajuato	357,720	39,555	11.06	4.0
9	Zitácuaro	Michoacán	489,399	38,326	7.83	3.9
10	Morelia	Michoacán	585,903	34,686	5.92	3.5
		Total	6,370,830	518,618	91.49	52

⁴ Los DDR (Distrito de Desarrollo Rural) son 192 unidades de gestión administrativa para el desarrollo agropecuario nacional operadas por la SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). Estos distritos son la base territorial para la implementación de los programas operativos de los sectores de producción rural en México (Congreso de la Unión, 2001)

Cuadro III—7. Distritos de Desarrollo Rural (SAGARPA), pertenecientes a zonas afectadas por la formación de cárcavas, en el Eje Neovolcánico Mexicano.

	DDR	Ent. Federativa	Superficie (ha) total DDR	Superficie (ha) DDR susceptible a cárcavas	Porcentaje DDR suscep. a cárcavas
1	(sin información)	México	212,253	1,624	0.77
2	Aguascalientes	Aguascalientes	555,850	821	0.15
3	Ahuacatlan - Tepic	Nayarit	735,770	1,073	0.15
4	Ameca	Jalisco	1,320,760	6,138	0.46
5	Apatzingan	Michoacán	491,550	24,875	5.06
6	Atacomulco	México	318,680	28,718	9.01
7	Cadereyta	Querétaro	407,470	3,738	0.92
8	Calpulalpan	Tlaxcala	172,585	17,944	10.40
9	Celaya	Guanajuato	357,720	39,555	11.06
10	Cholula	Puebla	419,851	41,299	9.84
11	Ciudad Guzman	Jalisco	1,302,716	23,958	1.84
12	Coatepec	Veracruz	379,088	4,448	1.17
13	Coatepec Harinas	México	284,998	1,080	0.38
14	Colima	Colima	268,790	2,575	0.96
15	Compostela - Tepic	Nayarit	313,860	2,303	0.73
16	Cortazar	Guanajuato	824,178	125,898	15.28
17	Dolores Hidalgo	Guanajuato	817,800	332	0.04
18	El Grullo	Jalisco	545,530	23,455	4.30
19	Fortin	Veracruz	588,452	872	0.15
20	Huajuapán (Mixteca)	Oaxaca	1,830,287	2,525	0.14
21	Huamantla	Tlaxcala	115,474	4,663	4.04
22	Huauchinango	Puebla	298,471	174	0.06
23	Huetamo	Michoacán	647,190	2	0.00
24	Huichapan	Hidalgo	436,930	5,521	1.26
25	Iguala	Guerrero	857,570	145	0.02
26	Izucar De Matamoros	Puebla	868,287	48,826	5.62
27	Jalpa	Zacatecas	419,810	4,799	1.14
28	Jilotepec	México	204,280	28,432	13.92
29	La Antigua	Veracruz	252,020	534	0.21
30	La Barca	Jalisco	534,170	17,708	3.32
31	La Huacana	Michoacán	510,400	2,524	0.49
32	La Piedad	Michoacán	448,742	69,286	15.44
33	Lagos De Moreno	Jalisco	1,472,680	40,613	2.76
34	Leon	Guanajuato	470,820	40,279	8.56
35	Libres	Puebla	450,517	7,319	1.62
36	Martinez De La Torre	Veracruz	601,303	2	0.00
37	Mixquiahuala	Hidalgo	467,624	7,707	1.65
38	Morelia	Michoacán	585,903	34,686	5.92
39	Nativitas	Distrito Federal	148,643	4,984	3.35
40	Pachuca	Hidalgo	353,233	14,562	4.12
41	Patzcuaro	Michoacán	472,265	14,879	3.15
42	Queretaro	Querétaro	203,630	28,629	14.06
43	Sahuayo	Michoacán	154,008	18,531	12.03
44	San Juan Del Rio	Querétaro	216,000	27,612	12.78
45	Tecamachalco	Puebla	433,250	39,850	9.20
46	Tehuacan	Puebla	402,650	2,894	0.72
47	Tejupilco	México	348,060	134	0.04
48	Texcoco	México	260,653	10,065	3.86
49	Teziutlan	Puebla	280,864	5,852	2.08
50	Tlapa	Guerrero	710,263	419	0.06
51	Tlaxcala	Tlaxcala	109,343	6,924	6.33
52	Toluca	México	288,609	14,632	5.07
53	Tomatlan - Ciudad	Jalisco	50,950	1,941	3.81
54	Tulancingo	Hidalgo	257,063	2,377	0.92
55	Uruapan	Michoacán	348,060	3,166	0.91
56	Valle De Bravo	México	196,557	7,510	3.82
57	Zacatepec Galeana	Morelos	485,927	22,926	4.72
58	Zacatlan	Puebla	261,307	13,471	5.16
59	Zamora	Michoacán	440,280	29,494	6.70
60	Zapopan	Jalisco	552,871	5,652	1.02
61	Zitacuaro	Michoacán	489,399	38,326	7.83
62	Zumpango	México	280,561	10,740	3.83

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El modelo cartográfico simuló satisfactoriamente, los lugares más propensos para el desarrollo de cárcavas.

El Eje Volcánico Mexicano presenta un 6.7% de su territorio con áreas afectadas o susceptibles a la formación de cárcavas.

El mapa de áreas afectadas o susceptibles a la formación de cárcavas posibilita el apoyo, entre otras aplicaciones, para el desarrollo de estrategias para la conservación de suelos a nivel regional y distrital.

El mapa de áreas afectadas o susceptibles a la formación de cárcavas, constituye información de partida para adoptar medidas de prevención de erosión en cárcavas, y para generar futuros mapas que permitan tener mayor información de este tipo de erosión, que es importante en la planificación y ordenamiento territorial.

Para poder obtener resultados más aproximados a la realidad, en estudios posteriores es importante contar con información más detallada y precisa de las características principales de la zona y agregar un mayor número procesos que inciden en la formación de este problema planteado; por ejemplo, clasificar las cárcavas por tipo de suelo y edad geológica, así como considerar la densidad de la población.

LITERATURA CITADA

- Bocco, G. 1989. Cartografía geomorfológica y análisis morfométrico para estudios de erosión acelerada. Estudio de caso en la Cuenca del Río Tlalpujahua, México. Boletín del Instituto de Geografía. 19:39-54.
- Demant A. 1978. Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación. Revista Instituto de Geología 2:172-187.
- Figuroa S. B., A. Amante, H. G. Cortés, J. Pimentel, E. S. Osuna, J. M. Rodríguez y J. F. Morales. 1991. Manual de predicción de pérdidas de suelo por erosión. Secretaría de Agricultura y de Recursos Hidráulicos. Colegio de Postgraduados. México.
- Fuentes-Delgado J. E. 2009. Aplicación de la geomorfometría para la definición de unidades fisiográficas de paisaje en una zona piloto del Parque Nacional Natural Puracé. Tesis Maestría. Universidad Mayor de San Simón.

- Gómez-Tuena, A., A. Lagatta, C. Langmuir, S. Goldstein, F. Ortega Gutiérrez and G. Carrasco Nuñez. 2003. Temporal control of subduction magmatism in the Eastern Trans-Mexican Volcanic Belt: mantle sources, slab contributions and crustal contamination: *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 4(8).
- Gómez-Tuena, A., M. T. Orozco-Esquivel y L. Ferraro. 2005. Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana. *Boletín de la sociedad geológica mexicana* 3: 227-283. México.
- INEGI. 1998. Conjunto de Datos Vectoriales Edafológicos. Continuo Nacional. Escala 1: 250 000. Serie I. México.
- INEGI. 2002. Conjunto de Datos Vectoriales Geológicos. Continuo Nacional. Escala 1: 250 000. Serie I. México.
- INEGI. 2007. Conjunto de Datos Vectoriales Uso del Suelo y Vegetación. Continuo Nacional. Escala 1:250 000. Serie IV. México.
- INEGI. 2010. Censo de Población y Vivienda.
- INEGI. 2013. Áreas Geoestadísticas Estatales del Marco Geoestadístico Nacional del Instituto nacional de Estadística y geografía. Escala 1: 250 000.
- Jenness, J. 2006. Topographic Position Index extension for ArcView 3.x, v. 1.2. Houston:Jenness Enterprises.
- Medina-Chena A., T. E. Salazar-Chimal y J. L. Álvarez-Palacio. 2010. Fisiografía y suelos, en E. Florescano y J. Ortiz Escamilla (coordinadores).
- Romero, F.J. y A. Velázquez. 1999. La región de montaña del sur de la Cuenca de México: una revisión de su importancia biológica. En: Velázquez A. y F. J. Romero (eds.). *Biodiversidad de la región de montaña del sur de la Cuenca de México: bases para el ordenamiento ecológico*. UAM-X-SEMARNAP.
- Poesen, J.W., K. Vandaele y B. Van-Wesemael. 1996. Contribution of gully erosion to sediment production on cultivated lands and rangelands. En: D.E. Walling y B.W. Webb (eds.), *Erosion and sediment yield: Global and regional perspectives*. IAHS Publ. No. 236, IAHS Press, Wallingford, pp. 251 – 266.

ANEXOS

Anexo 1. Superficie que ocupa las diferentes unidades litológicas del Eje Volcánico Mexicano.

CLASE	TIPO DE ROCAS	HECTÁREAS	PORCENTAJE
Ígnea		10,470,559	65.163
	Andesita	1,040,388	6.475
	Andesita-Brecha volcánica intermedia	139,597	0.869
	Andesita-Toba intermedia	172,442	1.073
	Arenisca-Toba ácida	8,312	0.052
	Arenisca-Toba básica	1,446	0.009
	Basalto	4,336,115	26.986
	Basalto-Brecha volcánica básica	297,396	1.851
	Basalto-Toba básica	27,628	0.172
	Brecha volcánica ácida	10,002	0.062
	Brecha volcánica básica	189,408	1.179
	Brecha volcánica intermedia	125,380	0.780
	Ceniza volcánica	24,966	0.155
	Dacita	49,693	0.309
	Dacita-Brecha volcánica ácida	30,850	0.192
	Dacita-Toba ácida	30,774	0.192
	Latita	8,607	0.054
	Riodacita	3,869	0.024
	Riodacita-Toba ácida	6,543	0.041
	Riolita	104,731	0.652
	Riolita-Brecha volcánica ácida	7,191	0.045
	Riolita-Toba ácida	703,590	4.379
	Toba ácida	1,277,577	7.951
	Toba ácida-Brecha volcánica ácida	52,673	0.328
	Toba básica	357,846	2.227
	Toba básica-Brecha volcánica básica	83,345	0.519
	Toba intermedia	394,997	2.458
	Toba intermedia-Brecha volcánica	1,055	0.007
	Traquita	4,252	0.026
	Vidrio	147	0.001
	Vidrio ácido	209	0.001
	Vitrófico dacítico	367	0.002
	Vitrófico riolítico	3,724	0.023
Volcanoclástico	975,437	6.071	
Ígnea		56,546	0.352
	Diorita	1,806	0.011
	Gabro	192	0.001
	Granito	25,365	0.158
	Granito-Granodiorita	21,304	0.133
	Granodiorita	3,790	0.024
	Monzonita	1,919	0.012
	Pórfido andesítico	1,465	0.009
	Sienita	298	0.002
	Tonalita	407	0.003
Metamórfica		398,681	2.481
	Esquisto	215,331	1.340
	Esquisto-Gneis	5,039	0.031
	Metagranito	650	0.004
	Metasedimentaria	159,849	0.995
	Metavolcánica	16,694	0.104
	Skarn	1,119	0.007
N/A		3,057,301	19.027
	Aluvial	2,457,047	15.291
	Eólico	1,456	0.009
	Lacustre	216,116	1.345
	Litoral	348	0.002
	N/A	275,652	1.716
	Palustre	1,467	0.009
	Residual	105,214	0.655

Sedimentaria		2,085,080	12.976
	Arenisca	160,442	0.999
	Arenisca-Conglomerado	560,821	3.490
	Brecha sedimentaria	178,641	1.112
	Caliche	62,769	0.391
	Caliza	390,890	2.433
	Caliza-Limolita	115,509	0.719
	Caliza-Lutita	51,845	0.323
	Caliza-Yeso	119	0.001
	Conglomerado	223,376	1.390
	Limolita-Arenisca	169,385	1.054
	Lutita	17,254	0.107
	Lutita-Arenisca	136,376	0.849
	Travertino	4,792	0.030
	Yeso	12,861	0.080
	Total general	16,068,167	

Anexo 2. Relación de tipo de rocas con la era y sistema geológicos del Eje Volcánico Mexicano.

CLASE	ERA	SISTEMA	TIPO	ÁREA (HA)	
Ígnea extrusiva	Cenozoico	Cuaternario	Andesita	15,139	
			Arenisca-Toba ácida	2,075	
			Arenisca-Toba básica	1,446	
			Basalto	452,271	
			Basalto-Brecha volcánica básica	187,385	
			Basalto-Toba básica	20,712	
			Brecha volcánica ácida	9,073	
			Brecha volcánica básica	137,140	
			Riolita	16,697	
			Toba ácida	213,758	
			Toba básica	356,656	
			Toba básica-Brecha volcánica básica	46,366	
			Vitrófico dacítico	367	
			Vitrófico riolítico	3,724	
			Volcanoclástico	155,752	
			Total Cuaternario	1,618,561	
			N/A		
				Andesita	109,566
				Andesita-Toba intermedia	18,819
				Basalto	3,342,761
			Basalto-Brecha volcánica básica	38,948	
			Brecha volcánica básica	36,197	
			Brecha volcánica intermedia	57,115	
			Dacita	4,276	
			Latita	736	
			Toba ácida	8,429	
			Toba básica-Brecha volcánica básica	13,185	
			Traquita	4,252	
		Total N/A	3,634,283		
			Neógeno		
			Andesita	862,540	
			Andesita-Brecha volcánica intermedia	134,987	
			Andesita-Toba intermedia	153,600	
			Basalto	541,083	
			Basalto-Brecha volcánica básica	71,063	
			Basalto-Toba básica	6,916	
	Brecha volcánica ácida	928			
	Brecha volcánica básica	16,071			
	Brecha volcánica intermedia	68,265			
	Ceniza volcánica	24,966			
	Dacita	44,785			
	Dacita-Brecha volcánica ácida	30,850			
	Dacita-Toba ácida	30,774			
	Latita	7,871			

		Total N/D		37,737
		Triásico	Esquisto	2,802
		Total Triásico		2,802
	Total Mesozoico			40,540
	Paleozoico	N/A	Esquisto	212,466
			Esquisto-Gneis	5,039
			Metagranito	650
			Metasedimentaria	135,478
			Metavolcánica	3,389
		Total N/A		357,022
	Total Paleozoico			357,022
	Total Metamórfica			398,681
	Cenozoico	Cuaternario	Aluvial	2,457,047
			Eólico	1,456
			Lacustre	216,116
			Litoral	348
			Palustre	1,467
			Residual	105,214
		Total Cuaternario		2,781,649
	Total Cenozoico			2,781,649
	N/A	N/A	N/A	275,652
		Total N/A		275,652
	Total N/A			275,652
	Total N/A			3,057,301
	Cenozoico	Cuaternario	Arenisca	313
			Arenisca-Conglomerado	43,357
			Brecha sedimentaria	19,921
			Caliche	62,769
			Conglomerado	57,669
			Travertino	4,792
		Total Cuaternario		188,820
		Neógeno	Arenisca	153,498
			Arenisca-Conglomerado	432,754
			Brecha sedimentaria	158,720
			Caliza	9,258
			Caliza-Limolita	115,509
			Conglomerado	114,463
			Limolita-Arenisca	105,244
			Lutita	3,401
			Lutita-Arenisca	48,927
			Yeso	12,457
		Total Neógeno		1,154,232
		Paleógeno	Arenisca	3,550
			Arenisca-Conglomerado	55,841
			Caliza	14,396
			Conglomerado	48,640
			Lutita-Arenisca	36,803
		Total Paleógeno		159,231
		Terciario	Limolita-Arenisca	47,286
		Total Terciario		47,286
	Total Cenozoico			1,549,569
	Mesozoico	Cretácico	Arenisca-Conglomerado	3,928
			Caliza	367,236
			Caliza-Lutita	30,961
			Caliza-Yeso	119
			Conglomerado	2,604
			Limolita-Arenisca	3,744
			Lutita	13,853
			Lutita-Arenisca	44,691
			Yeso	404
		Total Cretácico		467,539
		Jurásico	Arenisca	3,081
			Arenisca-Conglomerado	20,619
			Caliza-Lutita	20,884

	Limolita-Arenisca	13,111
	Lutita-Arenisca	5,954
	Total Jurásico	63,650
	Triásico	4,321
	Total Triásico	4,321
	Total Mesozoico	535,510
	Total Sedimentaria	2,085,080
	Total general	16,068,167

Anexo 3. Sistema de topoformas.

Nombre	Descripción de la Topoforma	Área (hectáreas)	Porcentaje
Cañón		94,117.19	0.59
	Cañón típico	94,117.19	
Depresión		6,193.22	0.04
	Depresión	6,193.22	
Llanura		3,397,222.01	21.43
	Llanura aluvial	1,527,653.32	
	Llanura aluvial con cañadas	38,534.49	
	Llanura aluvial con lomerío	466,192.72	
	Llanura aluvial con lomerío de piso rocoso o cementado	22,673.50	
	Llanura aluvial de piso rocoso o cementado	200,677.46	
	Llanura con cañadas de piso rocoso o cementado	0.01	
	Llanura con lomerío	109,159.63	
	Llanura con lomerío de piso rocoso o cementado	215,313.14	
	Llanura costera	24,075.68	
	Llanura costera con lagunas costeras salina	0.00	
	Llanura costera de piso rocoso o cementado	3,727.54	
	Llanura de piso rocoso o cementado	318,926.80	
	Llanura de piso rocoso o cementado con valles	0.00	
	Llanura deltaica	0.01	
	Llanura desértica de piso rocoso o cementado	0.00	
	Llanura salina	11,226.73	
	Vaso lacustre	120,425.44	
	Vaso lacustre con lomerío	56,570.44	
	Vaso lacustre con lomerío salino	17,089.79	
	Vaso lacustre de piso rocoso o cementado	145,940.77	
	Vaso lacustre inundable	9,824.31	
	Vaso lacustre inundable y salino	26,878.33	
	Vaso lacustre salino	82,331.89	
Lomerío		3,806,677.25	24.01
	Lomerío con cañadas	0.00	
	Lomerío con llanuras	0.00	
	Lomerío con mesetas	0.00	
	Lomerío de aluvión antiguo	640,074.93	
	Lomerío de aluvión antiguo con cañadas	102,108.35	
	Lomerío de aluvión antiguo con llanuras	152,895.78	
	Lomerío de aluvión antiguo con mesetas	44,484.18	
	Lomerío de basalto	1,134,159.33	
	Lomerío de basalto con cañadas	143,858.15	
	Lomerío de basalto con cráteres	61,774.52	
	Lomerío de basalto con llanuras	413,792.63	
	Lomerío de basalto con mesetas	205,700.38	
	Lomerío de basalto con sierras	79,144.86	
	Lomerío de tobas	489,562.20	
	Lomerío de tobas con cañadas	145,977.83	
	Lomerío de tobas con llanuras	154,051.87	
	Lomerío de tobas con mesetas	39,092.21	

	Lomerío típico	0.01	
Meseta		1,626,685.74	10.26
	Meseta asociada con malpaís	11,976.32	
	Meseta basáltica	116,079.86	
	Meseta basáltica con cañadas	413,714.03	
	Meseta basáltica con lomerío	552,082.23	
	Meseta basáltica con lomerío y malpaís	14,884.24	
	Meseta basáltica con malpaís	3,360.12	
	Meseta basáltica con sierras	290,730.27	
	Meseta basáltica escalonada	50,346.22	
	Meseta basáltica escalonada con cañadas	10,581.55	
	Meseta basáltica escalonada con lomerío	162,930.89	
	Meseta compleja con lomerío	0.00	
	Meseta de aluvión antiguo con cañadas	0.00	
	Meseta disectada	0.00	
	Meseta disectada con cañadas	0.00	
	Meseta típica	0.00	
Sierra		6,392,181.33	40.33
	Domo volcánico	37,086.76	
	Escudo volcanes	479,307.64	
	Escudo volcanes con calderas	42,335.26	
	Escudo volcanes con mesetas	30,516.56	
	Sierra alta	0.00	
	Sierra alta compleja	0.08	
	Sierra alta compleja con cañadas	0.01	
	Sierra alta compleja con lomerío	0.00	
	Sierra alta con cañadas	0.00	
	Sierra alta con mesetas	0.02	
	Sierra alta de laderas convexas	0.01	
	Sierra alta escarpada	0.02	
	Sierra baja	9,479.90	
	Sierra baja compleja	0.00	
	Sierra baja compleja con llanuras	0.00	
	Sierra baja escarpada	0.00	
	Sierra compleja	654,796.32	
	Sierra compleja con mesetas	14,327.49	
	Sierra compleja con valles	6,803.42	
	Sierra con laderas de escarpa de falla	470,610.27	
	Sierra con laderas de escarpa de falla con mesetas	53,694.74	
	Sierra de cumbres tendidas	0.02	
	Sierra de laderas escarpadas	0.00	
	Sierra de laderas tendidas	0.00	
	Sierra volcánica con estrato volcanes	39,016.07	
	Sierra volcánica con estrato volcanes o estrato volcanes aislados	1,161,600.77	
	Sierra volcánica con estrato volcanes o estrato volcanes aislados con llanuras	548,656.62	
	Sierra volcánica con estrato volcanes o estrato volcanes aislados con mesetas	150,877.02	
	Sierra volcánica de laderas escarpadas	1,379,505.34	
	Sierra volcánica de laderas escarpadas con cañadas	42,806.21	
	Sierra volcánica de laderas escarpadas con cráteres	6,541.01	
	Sierra volcánica de laderas tendidas	457,177.94	
	Sierra volcánica de laderas tendidas con cañadas	6,166.04	
	Sierra volcánica de laderas tendidas con llanuras	23,527.76	
	Sierra volcánica de laderas tendidas con lomerío	733,139.45	
	Sierra volcánica de laderas tendidas con mesetas	44,208.58	
Valle		528,533.27	3.33
	Valle abierto de montaña con lomerío	0.00	
	Valle de laderas escarpadas	23,346.56	

Valle de laderas escarpadas con lomerío	31,507.85
Valle de laderas tendidas	445,485.64
Valle de laderas tendidas con lomerío	28,193.20
Valle ramificado	0.01
Valle ramificado con lomerío	0.00

Anexo 4. Ubicación de cárcavas georreferenciadas en campo (Datum WGS84).

No.	Longitud	Latitud	Superficie m ²	Entidad	No.	Longitud	Latitud	Superficie m ²	Entidad
1	-102.094457	19.859159	53,426	México	51	-102.644894	19.745336	5,149	México
2	-102.080796	19.858603	3,560	México	52	-102.665363	19.744648	8,372	México
3	-102.075185	19.858317	23,419	México	53	-102.65679	19.739686	5,802	México
4	-102.087103	19.860156	39,340	México	54	-102.616167	19.739631	26,782	Michoacán
6	-102.099652	19.877985	4,963	México	55	-102.592424	19.716117	21,554	Michoacán
5	-102.111069	19.890552	3,822	México	56	-103.238432	20.00369	26,351	Michoacán
7	-102.109769	19.882657	4,424	México	57	-103.23219	20.003149	21,730	Michoacán
8	-102.075754	19.873803	2,433	México	58	-103.229365	20.005601	10,396	Michoacán
9	-102.056079	19.876753	8,480	México	59	-103.394379	19.985749	12,321	Michoacán
10	-102.113024	19.859862	49,712	México	60	-103.407392	19.984149	9,027	Michoacán
11	-102.107693	19.864741	10,262	México	61	-103.395934	19.979619	4,881	Michoacán
12	-102.294158	19.874671	2,501	México	62	-103.390662	19.9937	5,204	Michoacán
13	-102.288904	19.874849	4,537	México	63	-103.381611	20.00002	5,202	Michoacán
14	-102.937712	19.913204	1,049	México	64	-103.362615	19.995009	9,990	Michoacán
15	-102.9068	19.898782	5,084	México	65	-103.383128	20.018067	4,076	Michoacán
16	-102.838843	19.860513	5,816	México	66	-103.34303	20.018343	2,404	Michoacán
17	-102.836469	19.858061	6,185	México	67	-103.344243	20.00997	3,575	Michoacán
18	-102.84852	19.852475	12,943	México	68	-103.316643	20.020478	4,974	Michoacán
19	-102.78767	19.856224	56,495	México	69	-103.299905	19.987381	5,690	Michoacán
20	-102.791523	19.850969	94,312	México	70	-103.283431	19.978737	3,782	Michoacán
21	-102.774551	19.843698	75,705	México	71	-103.223171	20.001478	8,280	Michoacán
22	-102.75186	19.831426	35,614	México	72	-103.18718	20.027947	4,310	Michoacán
23	-102.760914	19.834098	113,151	México	73	-103.193401	20.020649	2,749	Michoacán
24	-102.751023	19.82427	94,133	México	74	-103.186217	20.022864	4,250	Michoacán
25	-102.741682	19.823156	23,771	México	75	-103.183749	20.022278	4,516	Michoacán
26	-102.742208	19.810123	30,697	México	76	-103.090998	19.982225	23,070	Michoacán
27	-102.739041	19.810391	47,840	México	77	-103.088822	19.983498	20,621	Michoacán
28	-102.723293	19.831716	17,076	México	78	-104.207916	20.461815	14,518	Michoacán
29	-102.711009	19.824799	22,158	México	79	-103.896702	20.246809	53,004	Michoacán
30	-102.705065	19.822636	16,764	México	80	-103.890265	20.248487	14,834	Michoacán
31	-102.700719	19.821074	8,396	México	81	-104.014158	20.349663	10,853	Michoacán
32	-102.808043	19.845696	21,327	México	82	-104.024635	20.348933	8,933	Michoacán
33	-102.789796	19.840565	33,133	México	83	-104.015584	20.351857	5,380	Michoacán
34	-102.805155	19.853102	10,462	México	84	-104.325067	20.491465	1,962	Michoacán
35	-102.780766	19.828759	77,260	México	85	-104.374556	20.47181	14,722	Michoacán
36	-102.73305	19.801865	12,557	México	86	-104.438368	20.736152	27,958	Michoacán
37	-102.751969	19.807611	13,667	México	87	-104.469739	20.72149	33,788	Michoacán
38	-102.557993	19.856874	17,961	México	88	-101.247181	19.589444	4,524	Michoacán
39	-102.545191	19.84933	29,099	México	89	-101.244753	19.588067	7,381	Michoacán
40	-102.522262	19.852642	7,849	México	90	-101.247367	19.580708	15,373	Michoacán
41	-102.524726	19.857467	7,557	México	91	-99.974165	19.726676	3,609	Michoacán
42	-102.500549	19.847781	6,809	México	92	-99.96627	19.728893	13,552	Michoacán
43	-102.498387	19.850089	10,117	México	93	-99.97829	19.736875	23,723	Michoacán
44	-102.594716	19.842283	15,512	México	94	-99.99095	19.725205	1,720	Michoacán
45	-102.585425	19.840827	14,150	México	95	-99.9987	19.714735	23,389	Michoacán
46	-102.578644	19.846003	16,399	México	96	-99.97552	19.696493	89,970	Michoacán
47	-102.660415	19.763286	3,392	México	97	-99.814473	19.82487	47,977	Michoacán
48	-102.659551	19.754119	39,406	México	98	-99.803712	19.829204	5,171	Michoacán
49	-102.649274	19.751202	13,015	México	99	-99.805386	19.830365	1,589	Michoacán
50	-102.651851	19.746851	15,806	México	100	-99.783722	19.834734	12,244	Michoacán
101	-99.817277	19.831181	12,145	Michoacán	152	-98.193313	19.617612	58,302	Jalisco

No.	Longitud	Latitud	Superficie m ²	Entidad	No.	Longitud	Latitud	Superficie m ²	Entidad
102	-99.812811	19.831542	9,022	Michoacán	153	-98.217371	19.628067	65,906	Jalisco
103	-99.842566	19.831819	8,371	Michoacán	154	-98.198547	19.640594	18,292	Jalisco
104	-99.824633	19.861291	38,465	Michoacán	155	-98.212938	19.592782	18,752	Jalisco
105	-99.809294	19.868118	5,605	Michoacán	156	-98.207648	19.571435	45,502	Jalisco
106	-99.783526	19.853866	16,361	Michoacán	157	-98.4838	19.774421	64,966	Jalisco
107	-99.793317	19.852698	2,889	Michoacán	158	-98.459093	19.798164	48,978	Jalisco
108	-101.639306	20.534635	17,681	Michoacán	159	-98.407767	19.790046	5,657	Jalisco
109	-99.672833	19.791683	4,646	Michoacán	160	-98.401993	19.791102	7,688	Jalisco
110	-99.615436	19.779298	3,525	Michoacán	161	-98.365511	19.808573	13,392	Jalisco
111	-99.527068	19.807499	23,725	Michoacán	162	-98.349781	19.805638	20,499	Jalisco
112	-99.51777	19.807526	7,009	Michoacán	163	-98.356244	19.802112	25,636	Jalisco
113	-99.508357	19.799318	8,591	Michoacán	164	-98.331762	19.808719	14,466	Jalisco
114	-99.500479	19.795044	3,277	Michoacán	165	-98.308609	19.808424	14,436	Jalisco
115	-99.495667	19.783869	14,029	Michoacán	166	-98.29398	19.807147	3,588	Jalisco
116	-99.499055	19.763602	9,386	Michoacán	167	-98.287173	19.808704	3,522	Jalisco
117	-99.773895	19.864975	3,414	Michoacán	168	-98.315581	19.857002	2,806	Jalisco
118	-99.819291	19.895447	23,238	Michoacán	169	-98.252407	19.873919	2,847	Jalisco
119	-99.822668	19.898292	10,445	Michoacán	170	-98.269152	19.884883	9,621	Jalisco
120	-99.829065	19.905066	3,927	Michoacán	171	-98.266588	19.885651	3,198	Jalisco
121	-99.791648	19.910402	8,974	Michoacán	172	-98.267096	19.890701	14,015	Jalisco
122	-99.803436	19.914273	3,841	Michoacán	173	-98.25717	19.907489	44,398	Jalisco
123	-99.798717	19.916975	8,259	Michoacán	174	-98.250027	19.92434	12,489	Jalisco
124	-99.784229	19.900502	12,563	Michoacán	175	-98.246607	19.919752	4,391	Jalisco
125	-99.829107	19.871974	18,192	Michoacán	176	-98.247679	19.910579	5,042	Jalisco
126	-99.728772	19.869493	11,069	Michoacán	177	-98.189006	19.877764	5,317	Jalisco
127	-99.700386	19.862717	8,152	Michoacán	178	-98.178121	19.875321	3,838	Jalisco
128	-99.654506	19.887418	3,301	Michoacán	179	-98.176053	19.877414	5,286	Jalisco
129	-99.668479	19.901128	8,140	Michoacán	180	-98.173821	19.878889	4,242	Jalisco
131	-99.626318	19.916014	22,463	Michoacán	181	-98.134524	19.867065	8,944	Jalisco
130	-99.491289	19.771936	2,767	Jalisco	182	-98.14187	19.870586	2,516	Jalisco
132	-99.488121	19.769102	2,135	Jalisco	183	-98.151257	19.870609	9,583	Jalisco
133	-99.501357	19.791457	7,435	Jalisco	184	-98.168534	19.867841	5,226	Jalisco
134	-99.497611	19.801563	5,969	Jalisco	185	-98.218833	19.859685	10,162	Jalisco
135	-99.486606	19.793788	18,433	Jalisco	186	-98.203235	19.860075	4,575	Jalisco
136	-99.452614	19.770841	18,918	Jalisco	187	-98.206593	19.862517	2,846	Jalisco
137	-99.422881	19.761005	4,207	Jalisco	188	-98.29543	19.96165	11,216	Jalisco
138	-99.395088	19.75746	20,627	Jalisco	189	-98.290142	19.966739	2,513	Jalisco
139	-99.248366	19.743411	26,521	Jalisco	190	-98.299234	19.973659	17,587	Jalisco
140	-99.493832	19.429123	41,005	Jalisco	191	-98.282399	19.977691	3,739	Jalisco
141	-99.530123	19.459635	6,523	Jalisco	192	-98.283132	19.979245	1,359	Jalisco
142	-99.52319	19.459372	5,065	Jalisco	193	-98.283562	19.981855	4,006	Jalisco
143	-98.336377	19.501044	78,272	Jalisco	194	-98.282205	19.981966	706	Guanajuato
144	-98.244763	19.456085	63,989	Jalisco	195	-98.28252	19.980848	1,154	Guanajuato
145	-98.24702	19.426827	20,542	Jalisco	196	-98.583617	20.196639	16,027	Guanajuato
146	-98.144263	19.485591	277,834	Jalisco	197	-98.552046	20.215537	25,028	Querétaro
147	-98.153512	19.504432	89,523	Jalisco	198	-98.541212	20.167971	30,657	Querétaro
148	-98.146567	19.503596	8,960	Jalisco	199	-98.535324	20.163946	23,101	Querétaro
149	-98.127932	19.510155	9,035	Jalisco	200	-98.540124	20.164891	18,457	Querétaro
150	-98.204083	19.526965	15,222	Jalisco	201	-98.523394	20.164511	4,954	Querétaro
151	-98.232984	19.599002	145,655	Jalisco	202	-98.518997	20.170131	9,018	Querétaro
203	-98.547721	20.182398	5,655	Querétaro	254	-102.257239	20.525672	4,487	Puebla
204	-98.604107	20.094081	2,818	Querétaro	255	-102.223363	20.459992	10,258	Puebla

No.	Longitud	Latitud	Superficie m ²	Entidad	No.	Longitud	Latitud	Superficie m ²	Entidad
205	-98.237481	20.084039	13,016	Querétaro	256	-102.153978	20.475392	9,184	Puebla
206	-98.229259	20.082929	3,275	Querétaro	257	-102.140455	20.478263	65,034	Puebla
207	-98.228998	20.07334	9,895	Querétaro	258	-102.125793	20.497943	8,002	Puebla
208	-98.224604	20.076866	3,850	Querétaro	259	-102.120949	20.505243	9,328	Puebla
209	-98.206918	19.922881	6,530	Querétaro	260	-102.156361	20.504663	3,414	Puebla
210	-98.192657	19.930756	10,818	Querétaro	261	-101.954804	20.095904	16,489	Hidalgo
211	-98.135286	20.00295	10,615	Querétaro	262	-101.991719	20.142756	11,936	Hidalgo
212	-98.615052	20.291225	26,890	Querétaro	263	-102.182376	20.566786	21,807	Hidalgo
213	-98.616614	20.298066	2,568	Querétaro	264	-102.185885	20.570062	3,162	Hidalgo
214	-98.610524	20.30089	35,287	Querétaro	265	-102.194579	20.583489	3,077	Hidalgo
215	-98.612055	20.304668	13,588	Querétaro	266	-102.330036	20.608157	15,896	Hidalgo
216	-98.62068	20.310927	11,152	Querétaro	267	-102.296508	20.72799	5,385	Hidalgo
217	-98.625618	20.308084	7,403	Querétaro	268	-102.302351	20.733477	6,173	Hidalgo
218	-98.621313	20.286763	11,895	Querétaro	269	-102.280762	20.776807	2,595	Hidalgo
219	-98.646695	20.264355	3,165	Querétaro	270	-102.208906	20.749298	16,082	Hidalgo
220	-100.361561	20.360217	15,951	Querétaro	271	-101.555022	20.164372	6,899	Hidalgo
221	-100.381471	20.34301	32,028	Querétaro	272	-101.587815	20.156408	34,821	Hidalgo
222	-100.38953	20.335284	8,336	Querétaro	273	-101.571901	20.185081	30,538	Hidalgo
223	-100.428245	20.349467	4,439	Querétaro	274	-101.358427	19.808887	17,430	Hidalgo
224	-100.379284	20.320513	2,821	Querétaro	275	-101.343249	19.807694	8,599	Hidalgo
225	-100.378655	20.319236	5,993	Querétaro	276	-101.351205	19.811742	3,227	Hidalgo
226	-100.388023	20.313966	27,587	Tlaxcala	277	-101.33129	19.814981	17,206	Hidalgo
227	-100.390931	20.310926	20,506	Tlaxcala	278	-101.282756	19.84953	7,487	Hidalgo
228	-100.384348	20.306738	11,100	Tlaxcala	279	-101.29215	19.869768	7,250	Hidalgo
229	-100.378944	20.305813	3,272	Tlaxcala	280	-101.295103	19.871928	2,776	Hidalgo
230	-100.377273	20.305676	21,285	Tlaxcala	282	-101.31351	19.84671	2,332	Hidalgo
231	-100.3552	20.314148	102,031	Tlaxcala	281	-101.288362	19.711417	3,725	Hidalgo
232	-100.349712	20.341371	15,457	Tlaxcala	283	-101.363468	19.802157	10,894	Hidalgo
233	-100.348553	20.344078	16,472	Tlaxcala	284	-101.38123	19.767793	3,556	Hidalgo
234	-100.354534	20.34897	7,286	Tlaxcala	285	-101.379819	19.770094	9,745	Hidalgo
235	-100.340067	20.330076	3,281	Tlaxcala	286	-101.387311	19.764591	14,272	Hidalgo
236	-100.341224	20.328443	10,201	Tlaxcala	287	-101.394482	19.760193	1,817	Hidalgo
237	-100.333514	20.324564	6,190	Tlaxcala	288	-100.898311	19.768757	11,199	Hidalgo
238	-100.32117	20.324619	21,581	Tlaxcala	289	-100.88336	19.770649	6,442	Hidalgo
239	-100.310475	20.335979	5,337	Tlaxcala	290	-100.917542	19.762361	1,209	Hidalgo
240	-100.312086	20.338061	3,941	Puebla	291	-100.44887	19.717476	31,669	Hidalgo
241	-100.299153	20.331472	1,344	Puebla	292	-100.403387	19.713636	29,679	Hidalgo
242	-100.297929	20.331832	4,046	Puebla	293	-100.399592	19.708142	8,056	Hidalgo
243	-100.287442	20.337184	9,793	Puebla	294	-100.410398	19.712584	4,758	Hidalgo
244	-100.272009	20.320816	1,683	Puebla	295	-100.41422	19.708047	1,087	Hidalgo
245	-100.267034	20.326851	2,406	Puebla	296	-100.41211	19.708853	2,228	Hidalgo
246	-100.263229	20.332408	2,136	Puebla	297	-100.419824	19.692522	17,858	Hidalgo
247	-100.265571	20.332642	4,251	Puebla	298	-100.420653	19.696265	4,070	Hidalgo
248	-100.258985	20.316258	6,544	Puebla	299	-100.344988	19.720757	8,614	Hidalgo
249	-100.247636	20.329817	5,601	Puebla	300	-100.424216	19.73263	7,161	Hidalgo
250	-100.365713	20.495417	18,116	Puebla	301	-100.390794	19.727888	19,870	Hidalgo
251	-99.642963	20.121997	4,214	Puebla					
252	-99.647086	20.118005	48,524	Puebla					
253	-102.291618	20.527319	10,475	Puebla					