

SOILS VULNERABILITY ASSESSMENT FOR THE STATE OF DURANGO, MEXICO WITHIN THE CONTEXT OF CLIMATE CHANGE

EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD DE LOS SUELOS DEL ESTADO DE DURANGO, MÉXICO EN EL CONTEXTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Armando López-Santos¹, Ignacio Sánchez Cohen², Gerardo Esquivel Arriaga², José Luis González Barrios²

¹Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas, Universidad Autónoma Chapingo. Dom. Conocido s/n Cd. Bermejillo, Dgo. CP 35230. AP # 8 (armando.lopezsantos@gmail.com y alopez@chapingo.uruza.edu.mx), ²Centro Nacional de Investigación Interdisciplinaria en Relaciones Agua Suelo Planta Atmósfera del INIFAP, Gómez Palacio, Dgo, Mex.

Resumen

Se evaluó el grado de vulnerabilidad actual y futura de los sistemas naturales y agroproductivos de Durango, México ante los impactos probables del cambio climático. Esta investigación comprende todo el territorio (123,181 Km²) duranguense (26.8° y 22.316° latitud Norte; -102.466° y -107.183 longitud Oeste), donde se distinguen dos zonas climáticas: templado (36%) y tropical seco (64%). Las tasas de erosión hídrica laminar histórica (TEHL_h) fue calculada mediante la ecuación universal de pérdida de suelo (EUPS) calibrada para México, y la tasa de erosión hídrica laminar para el escenario futuro más extremo, A2 (TEHL_{A2}) se empleó la técnica de reducción de escala mediante el SDSM (*Statistical Downscaling Method*), usando registros climáticos de 29 Estaciones del Servicio Meteorológico Nacional Mexicano (EM-SMN) para representar los distintos ambientes que lo caracterizan. Se estima que por su condición de exposición los suelos de Durango históricamente han perdido un promedio de 163.8 ton·ha⁻¹·año⁻¹ y en el escenario futuro para el periodo 2010-2039 es probable una disminución promedio anual menor al 5%. En el escenario A2 hay una alta probabilidad de lluvia más escasas e incremento de la temperatura promedio, circunstancia bajo la cual las prácticas de uso y cambio de uso del suelo (pecuario ↔ forestal ↔ agrícola) tendrán que ser cuidadosamente planificadas; asimismo, una menor disponibilidad humedad en el suelo tendrá como consecuencia un incremento en la vulnerabilidad del suelo a la erosión eólica.

Palabras clave: EUPS, Costos de adaptación, cambio climático, erosión del suelo

Introducción

La evaluación más reciente sobre el ambiente y los recursos naturales de México, indica que el Estado de Durango hasta 2005 tuvo una superficie afectada, por erosión hídrica y eólica, de alrededor de 49 mil Km² que representaron el 40.26% de la superficie estatal y el 23.16% del total nacional afectado, estimado en 403 mil km²; esto debido a características fisiográficas donde se combinan ambientes secos y de montaña, condición bajo la cual se produce una fragilidad mayor de los suelos (UN-AGENDA 21, 1992; SEMARNAT, 2005; Cotler, 2007).

Los estudios de vulnerabilidad son la base para definir acciones de adaptación y mitigación al cambio climático (Cárdenas, 2010). En regiones cuyos recursos se encuentran en una situación crítica, como los suelos del Estado de Durango, la fragilidad de un sistema se detecta por los impactos debido a una condición de exposición y su grado de sensibilidad, el cual tiene una cierta capacidad de adaptación según el rango de fortaleza particular que tenga (Garrido y Cotler, 2010); aunque también hay que reconocer que el uso del suelo es un tema muy discutido cuando se aplican criterios ambientales, sociales y económicos, puesto que se trata de las intervenciones humanas en la naturaleza. El carácter de la intervención y las características del ecosistema definen que tan significativo es el daño, pues la pertinencia de la actividad y la resiliencia (resistencia y

capacidad de recuperación) del sistema natural definen si el costo valió la pena (Medellin, 2002).

Derivado de lo anterior, el propósito del presente estudio fue evaluar la vulnerabilidad actual y futura de los suelos del Estado de Durango, considerando el grado de exposición y sensibilidad ante la amenaza del cambio climático relacionada con los cambios en la intensidad y distribución de la lluvia.

Materiales y métodos

Localización y características del área de estudio

Durango se ubica en la zona central norte de la República Mexicana entre los paralelos 22.316° y 26.8° de latitud

norte y entre los meridianos 107.183° y 102.466° de longitud oeste. Está dentro de la región de Norte América, colinda con los Estados de Chihuahua, Nayarit, Jalisco, Coahuila de Zaragoza, Sinaloa y Zacatecas. Cuenta con una superficie de 123,181 km², ocupando el cuarto lugar por su extensión, con el 6.3% del total nacional (SEDCO, 2009; EMM, 2009); destaca además por sus contrastes climáticos que se combinan con topografía irregular con alturas que van desde los 200 metros sobre el nivel del mar (msnm) en los límites con los estados de Sinaloa y Nayarit, hasta alrededor de 3,200 msnm (INEGI, 2009); se encuentra en una amplia región latitudinal: al sur del Trópico de Cáncer, en la zona tropical; y al norte, en la zona templada (Figura 1).

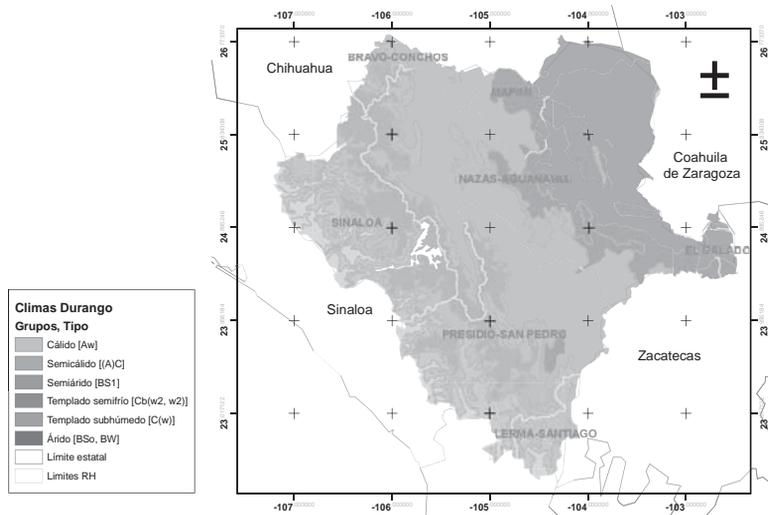


Figura 1. Ubicación geográfica, colindancias, Regiones Hidrológicas (RH) y grupos climáticos de Durango, México.

Unidad básica de estudio y enfoque

El presente estudio se basó en la delimitación de siete Regiones Hidrológicas (Figura 1) definidas por la Comisión Nacional del Agua (CNA, 1998). El análisis de vulnerabilidad de los suelos (VS) para las RH se basó en el enfoque de vulnerabilidad propuesto por Downing *et al.*, (2005), el cual ha sido aplicado recientemente para evaluar el impacto del cambio climático en México por Cotler *et al* (2010), cuya expresión es la siguiente:

$$VS=fI-CA=f(E+S-CA) \quad (Ec. 1)$$

Donde, *I*, es el impacto debido a una condición de exposición (*E*) y su grado de sensibilidad (*S*); *CA*, es la capacidad de adaptación según las propiedades de resistencia a la acción de los factores erosivos, sean estos de carácter natural o inducidos por la acción humana.

Ecuación universal de pérdida de suelo (EUPS)

Para determinar la tasa de suelo erosionado, actual y potencial, se utilizó la EUPS propuesta por Kirby y Morgan (1980), mediante:

$$PS=R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (Ec. 2)$$

Donde, PS es la tasa de erosión en $\text{kg ha}^{-1} \text{año}^{-1}$; R , es el factor de erosividad (vulnerabilidad) por la precipitación pluvial; K , es el factor de erodabilidad (vulnerabilidad) del suelo; L , es un factor de longitud de pendiente; S , es un factor de gradiente de pendiente; C , es un factor de cultivo; y P , es un factor relacionado con el método de control de la erosión.

Análisis regionalizado de la lluvia y fuente de información

El análisis regionalizado de la lluvia de 29 EM-SMN, 21 de Durango, 2 de Chihuahua, 2 de Coahuila, 2 de Nayarit, y 1 Sinaloa, se basó en un proceso de reducción de escala espacial (Figura 2), asociadas a los datos climáticos que provienen de la malla de gran resolución de los Modelos de Circulación General (MCGs) del IPCC, mediante la aplicación del SDSM (*Statistical Downscaling Model*), el cual, calcula las relaciones estadísticas por medio de técnicas de regresión lineal múltiple entre el clima a gran escala (los predictores) y el clima local (el predictando) (Kannan y Ghosh, 2010).

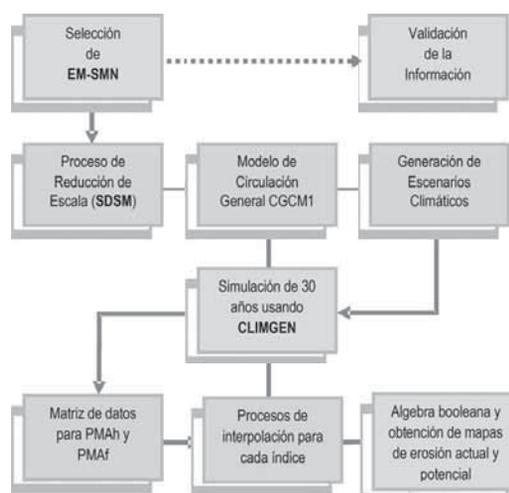


Figura 2. Pasos del análisis climático para determinar erosión actual y potencial.

Los datos de los predictores fueron obtenidos del modelo de circulación canadiense CGCM1 del Centro Canadiense de Modelación y de Análisis Climático. La página de obtención de los datos es la siguiente: <http://www.cics.uvic.ca/scenarios/sdsm/select.cgi>.

Variables y generación de índices

Las variables de entrada para el cálculo de pérdida de suelo (actual y futura) en el territorio estatal se trabajaron a partir de índices de acuerdo a las metodologías propuestas por Morgan (1986), Vázquez (2010),

Santacruz (2011) y Montes-León *et al.*, (2011), para la precipitación media anual histórica y la del escenario 2010-2030 (Tabla 1).

Herramientas de trabajo y procesos digitales

Las herramientas de trabajo empleadas se basaron en la edición de las tablas de atributos de las capas vectoriales shp (ESRI) relacionadas con los índices ya descritos (Tabla 1), y posteriormente convertidas a capas Raster (TIF), con los cuales se resolvió la EUPS mediante álgebra booleana (Ec 2).

Tabla 1. Índices para estimar pérdida de suelo erosión actual y potencial 2010-2030.

Índice/Factor (EUPS)	Descripción del factor
<i>Factor erosividad de la lluvia (F)</i>	
PMAh	Precipitación media anual histórica de 45 estaciones climatológicas con al menos 30 años de registros.
PMAe	Precipitación media anual calculada para el escenario climático obtenido del modelo de circulación canadiense CGCM1 del Centro Canadiense de Modelación y de Análisis Climático.
<i>Factor erodabilidad del suelo (K)</i>	
USD	Unidad de suelo dominante identificado con base en la cobertura cartográfica para el territorio estatal en escala 1:250,000, donde se especifican propiedades físico-químicas.
TEX	Textura del suelo para tres fracciones (arena, limo y arcillas) identificada como dominante por Unidad de suelo.
<i>Factor asociado a la topografía (L^S)</i>	
LS	Longitud y grado de pendiente que definen el efecto de la topografía sobre la erosión del suelo para los siguientes rangos de pendiente: 0-1, 3-5 y > 5 %.
<i>Factor asociado a las existencias vegetales (C)</i>	
VEG	La vegetación se asigna como un coeficiente de escurrimiento con el objeto de reflejar el efecto de la vegetación y las prácticas de manejo de los suelo en las tasas de erosión.

Resultados y discusión

Erosividad de la lluvia: factor R

La erosividad de la lluvia indica el potencial erosivo de la lluvia. Normalmente este factor está determinado con los datos de intensidad máxima de lluvia en treinta minutos consecutivos (I_{30}) y la energía cinética asociada (E_c); el producto de ambos, es la erosividad de la lluvia (Montes León *et al.*, 2011). Para calcular el valor de R se utilizó

la precipitación media anual de las series históricas (PMA_h) y los resultados del proceso de reducción de escala con el SDMS para esta misma variable (PMA_{EP}), fue deducida para dos Zonas: la del Oeste (Nazas-Aguanaval, Mapimí, Bravo-Conchos y El Salado) y la del Este (Sinaloa, Presidio-San Pedro, Lerma-Santiago), mediante la aplicación de las ecuaciones propuestas por Becerra (1999) y recientemente usadas por Montes León *et al.* (2011) (Tabla 2).

Tabla 2. Ecuaciones empleadas para determinar el valor de R de la EUPS

Zonas	Ecuaciones Regionalizadas	Regiones Hidrológicas	R ²
Oeste	$3.6752 \cdot PMA - 0.001720 \cdot PMA^2$	3	94
Este	$2.8959 \cdot PMA + 0.002983 \cdot PMA^2$	4	92

Fuente: Montes León *et al.*, 2011; PMA= Precipitación media anual.

Los resultados del análisis de para la lluvia histórica (1970-2000), indica la erosividad se por lluvia para zona Oeste presenta los impactos más altos por unidad de superficie encontrándose en los rangos desde 1,336.8 hasta 1,963.2 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹.

Unidades de suelo susceptibles a la erosión: Factor K

El factor K indica el grado de sensibilidad o resistencia de un horizonte específico del suelo a la erosión y se concibe como la facilidad con la cual es desprendido por: el salpicado de las gotas durante un evento de lluvia, el flujo superficial, o bien, por la acción de ambos fenómenos (Montes León *et al.*, 2011). Para determinar el valor de K, se empleó la información edafológica más reciente del INEGI (2007): Conjunto de Datos Vectoriales

Edafológico, escala 1:250,000, Serie II (Continuo Estatal), que contiene información actualizada durante el periodo 2002-2006, donde se emplea la clasificación de suelos del WRB (*World Reference Base for Soils Resources*); las características que se obtuvieron de esta información son tipo de suelo y textura. De acuerdo a la clasificación del tipo de suelo y textura superficial (gruesa, media o fina), se le asigna el factor K, el cual está representado en el Tabla 3.

Tabla 3. Factor K, de acuerdo con el tipo de suelos de la clasificación desarrollada por la WRB.

Nombre	Calve	----- Textura -----			Nombre	Calve	----- Textura -----		
		Gruesa	Media	Fina			Gruesa	Media	Fina
Acrisol	AC	0.026	0.04	0.013	Leptosol	LP	0.013	0.02	0.007
Arenosol	AR	0.013	0.02	0.007	Luvisol	LV	0.026	0.04	0.013
Chernozem	CH	0.013	0.02	0.007	Phaeozem	PH	0.013	0.02	0.007
Calcisol	CL	0.053	0.079	0.026	Regosol	RG	0.026	0.04	0.013
Cambisol	CM	0.026	0.04	0.013	Solonchak	SC	0.026	0.04	0.013
Durisol	DU	0.053	0.079	0.026	Solonetz	SN	0.053	0.079	0.026
Fluvisol	FL	0.026	0.04	0.013	Umbrisol	UM	0.026	0.04	0.013
Gipsol	GY	0.053	0.079	0.026	Vertisol	VR	0.053	0.079	0.026
Castañozem	KS	0.026	0.04	0.013	Otros	H ₂ O	1	1	1

Fuente: Montes León *et al.*, 2011.

Sensibilidad de los suelos a la erosión por la topografía: Factor LS

El efecto de la topografía sobre la erosión del suelo está representado por los factores: longitud (L) y el grado de pendiente (S). La longitud se define como la distancia desde el punto de origen de un escurrimiento hasta el punto donde decrece la pendiente, al grado en que ocurre una sedimentación o bien hasta el punto donde el escurrimiento, una vez concentrado, encuentra un canal de salida bien definido; para su determinación se empleó la metodología propuesta por Renard (1997), de la siguiente forma:

$$LS = x \cdot 22.13m \cdot (0.065 + 0.045 \cdot S + 0.0065 \cdot S^2) \quad (Ec. 3)$$

Donde, x es la longitud del tramo de pendiente S , en metros; S , es la pendiente en porcentaje, en cuyo caso se emplearon tres rangos: 0-1, 3-5 y $> 5\%$; y m , es el exponente que depende del desnivel de la zona de estudio.

Las áreas más sensibles a la erosión de acuerdo al cálculo del Factor LS corresponden a los suelos ubicados al Oeste del Estado de Durango, en rangos de pendiente de 3 a 5% y mayores al 5%, seguidos por los que se localizan desde la parte central del territorio estatal hasta en rangos de pendiente de 0 al 1%.

Sensibilidad de los suelos por uso y cambios de uso del suelo: Factor C

El factor C debe ser asignado con el objeto de reflejar el efecto de la vegetación y las prácticas de manejo de los suelos en las tasas de erosión, usado con más frecuencia para realizar cálculos relacionados con el comportamiento de los escurrimientos en sistemas de corrientes superficiales (SARH-SPP-CP, 1991); es decir, las diferentes prácticas de manejo según las características asociadas en un plan de conservación determinarán la tasa promedio anual de erosión, y

cómo la pérdida potencial de suelo se distribuirá en el tiempo durante las actividades de construcción, rotación de cultivos u otros esquemas de manejo, así como los cambios en el uso del suelo (Montes-León *et al.*, 2011; Santacruz, 2011).

En este caso, los factores C corresponden a la información más reciente de uso del suelo y vegetación

publicados por el INEGI (2011) en formato vectorial (shp) en escala 1:250,000 de la serie IV, de manera que éstos corresponden al promedio de los reportados por Montes-León *et al.* (2011) para la serie IV con base en la homologación entre la clasificación propuesta por el IPCC (2003) y la empleada en México por el INEGI (Tabla 4).

Tabla 4. Homologación de los grupos de vegetación entre el IPCC y las Series III y IV del INEGI, México y asignación del factor C.

IPCC, 1996 ^(a)		USV-Serie III ^(b)	USV-Serie IV ^(c)	Factor C
Bosques Templados	Grupo 1. Siempreverdes	Bosque de Pino	Bosque de Coníferas	0.01
		Bosque de Pino-Encino	Bosque Cultivado	0.01
		Bosque de Táscate		0.01
		Bosque Bajo Abierto		ND
		Bosque de Oyamel		0.01
	Grupo 2. Latifoliadas	Encino	Bosque de Encino	0.1
	Bosque de Encino-Pino	Bosque Mesofilo	0.01	
Bosques Tropicales	Grupo 3. Húmedos	Selva Media Subcaducifolia	Selva Subcaducifolia	0.45
		Matorral subtropical		0.12
	Grupo 4. Estacionales	Selva Baja Espinosa	Selva Caducifolia	0.50
		Selva Baja Caducifolia		0.50
	Grupo 5. Secos	Mezquital	Matorral Xerófilo A	0.65
		Matorral Submontano		0.35
		Matorral Crasicaule		0.65
		Matorral Desértico Microfilo		0.25
		Matorral Desértico Rosetofilo		0.25
		Matorral Sarcocaulo		0.25
		Chaparral		0.65
		Vegetación Gipsófila		Matorral Xerófilo S
	Vegetación Halófila	0.85		
	Arenosos	0.85		
	Grupo 6. Pastizal	Pastizal Halófilo	Pastizal	0.25
		Pastizal Natural		0.07
		Pastizal-Huizachal		ND
Pastizal Cultivado-Agricultura de Temporal		0.75		
Pastizal Inducido		Vegetación Inducida 2	0.02	
Pastizal Inducido, Agricultura de Temporal			0.75	
Pastizal Inducido, Vegetación Secundaria de Selva			0.75	

Fuentes de referencia para la homologación:

^aIPCC-D, 1996. Directrices del IPCC para los inventarios de gases de efecto invernadero, versión revisada en 1996: Módulo 5, Libro de trabajo. 58 p. Disponible en: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/guidelin/ch5wb1.pdf>; ^bINEGI-DURANGO, 2003. Vectoriales shp de Uso de Suelo y Vegetación del Estado de Durango de la Serie III; ^cINEGI-DURANGO, 2010. Vectoriales shp de Uso de Suelo y Vegetación del Estado de Durango de la Serie IV.

Capacidad de adaptación natural e inducida al cambio climático

En teoría la vulnerabilidad del suelo a la acción de los factores ambientales más la participación del hombre ponen en juego su propia resiliencia o capacidad de tolerar los disturbios sin colapsarse, y como consecuencia de dicha acción se promovería cambios a un estado cualitativamente diferente; considerando que dicha capacidad (resiliencia) es controlada por diferentes procesos, pero la memoria ecológica es un componente clave de la resiliencia, porque representa la capacidad del sistema para absorber perturbaciones, reorganizar y mantener la capacidad de adaptación (Thompson *et al.*, 2009).

Bajo este razonamiento se entiende que el impacto del cambio climático (I) definido por el grado de exposición (E) y sensibilidad (S) de los suelos del Estado de Durango, en este caso es atenuado por su propia capacidad de adaptación (CA) en un contexto ecosistémico del que el suelo forma parte; propiedad que puede ser de origen natural o influida por la acción antrópica mediante prácticas agronómicas de manejo adecuadas del suelo; de modo que ambas propiedades para los suelos del Estado de Durango se discuten brevemente como complemento a la información expuesta en las secciones anteriores.

El enfoque de este análisis para evaluar la capacidad de adaptación natural del suelo tiene como base la consideración de que el suelo (S) es un cuerpo natural resultado de procesos de transformación del material madre o roca (*Lr*) por la acción individual o combinada de los factores ambientales como son clima (*C*), biota (*B*) y relieve (*T*), los cuales dependen del tiempo (*t*) ocurrido en el proceso de transformación de *Lr*, como lo planteo originalmente Dokuchaiev a finales del siglo XIX en Rusia, y fuera retomado por la academia en las Universidades de Estados Unidos de América hasta que Jenny en 1941, en su libro "*Factor of Soil Formation*", lo expresó en una notación matemática como: (Simonson, 1997); es indiscutible la validez que mantiene el concepto citado anteriormente tratándose de procesos naturales que otros autores ya han considerado (Bockheim and Gennadiyev, 1999; Kumar *et al.*, 2011).

La erosividad o erodabilidad climática definida como (Mikhailova *et al.*, 1997) la agresividad del clima como

la lluvia, viento, sequía, etc., es la causa de la erosión. El factor de erosividad de la lluvia (R), o el factor R, en el modelo EUPS ya descrito, es un índice de erosividad de la lluvia, que es contrarrestado por las fuerzas naturales del suelo a resistir el procesos erosivo que comprende al menos cuatro acciones descritas por Kirby y Morgan (1980): 1) impacto de las gotas de lluvia sobre la superficie del suelo; 2) probable sellado de los poros en la superficie del suelo; 3) infiltración, saturación y formación de flujo; y 4) resistencia a la sedimentación.

La capacidad de adaptación del suelo inducida por la acción antrópica se refiere a la acción individual o combinada de los actores del medio rural relacionados directa e indirectamente con la problemática de la erosión del suelo (sistema institucional y sistema socioeconómico), puesto que la erosión y degradación de los suelos tiene como origen cambios por extracción y manejo de la vegetación por las actividades forestales, ganaderas, agrícolas y por el crecimiento de los asentamientos humanos y las zonas urbanas (Cuevas *et al.*, 2010).

Por un lado es de considerarse la acción gubernamental que por ley le obliga para que promuevan, divulguen y ejecuten programas encaminados a la conservación de los recursos naturales (agua, suelo, biodiversidad, etc.), así como mediante la participación de los productores, de manera individual o bien integrados en organizaciones no gubernamentales donde se encuentran los prestadores de servicios, técnicos, los mismos beneficiarios (productores y/o usufructuarios de la tierra) de las acciones de conservación y restauración de suelos, asociaciones civiles y las universidades.

Al respecto, es importante mencionar que en este caso se considera la información relacionada con la acción gubernamental en materia de obras y servicios enfocados a la conservación de suelo encabezados por la SEMARNAT-CONAFOR para zonas de bosque, así como la SAGARPA-CONAZA, mediante diferentes programas, donde destaca el Programa de Sustentabilidad de los Recursos Naturales, en particular el de Conservación y Uso Sustentable de Suelo y Agua (COUSSA), y de los proyectos transversales donde actúa la Comisión Nacional para las Zonas Áridas (CONAZA) en los tres niveles de gobierno (federal, estatal y municipal, conforme a los siguientes datos:

Entre 2007 y 2010, la CONAFOR ha apoyado a los pobladores de terrenos forestales, para la protección, rehabilitación y manejo sustentable, con más de 17 mil millones de pesos, mediante los siguientes programas: Servicios Ambientales, Reforestación y conservación de suelos (PROCOREF), Desarrollo Forestal (PRODEFOR), Germoplasma de Planta, Plantaciones Forestales (PRODEPLAN), Incendios Forestales y

Cuencas Prioritarias (Torres-Rojo, 2011); aunado a esto, la SAGARPA (2011) reporta que en el período 2008-2010 el Componente de Conservación y Uso Sustentable de Suelo y Agua (COUSSA) ha apoyado la construcción de más de diez mil obras hidroagrícolas con capacidad para almacenar 113 millones de metros cúbicos de agua (Tabla 5).

Tabla 5. Obras enfocadas a la Conservación y Uso Sustentable de Suelo y Agua entre 2008 y 2010.

Tipo de obra	Número de obras	Almacenamiento promedio (m ³ /obra)
Bordos de tierra compactada	7,283	11,350
Pequeña presa de mampostería	1,548	16,039
Pequeña presa de concreto	106	34,453
Ollas de agua	902	1,607
Jagüeyes	668	778

Fuente: SAGARPA, 2011.

Los acciones y beneficios de dichos programas gubernamentales comprenden aproximadamente el 10% para el Estado de Durango, cuyos objetivos se relacionan con la conservación, uso y manejo sustentable de los recursos naturales utilizados en la producción primaria, a partir de los cuales se promueven obras (SAGARPA 2011) tales como: 1) Bordos de agua para ganado, 2) Diseño y construcción de terrazas, 3) Tinas ciegas, 4) Zanjas bordos, 5) Adquisición de semilla para repastización, 6) Cercados de áreas de exclusión y división de potreros, 7) Reforestación con especies nativas, 8) Paso de rodillo aereador, 9) Cabeceo de cárcavas, 10) Pequeñas presas de mampostería, 11) Barreras rompevientos, 12) Bebederos para ganado, entre otros.

Vulnerabilidad del caso de estudio

Primeramente, es importante mencionar que con el fin de calificar el grado de erosión laminar hídrica para Durango, se toma como referencia seis tipos propuestos en la literatura (Santacruz, 2011; Montes-León *et al.*, 2011), en la que los límites de los rangos extremos van de <50 a >250 ton ha⁻¹ año⁻¹.

Erosión laminar histórica y para el escenario 2010-2030

Para la descripción de las variables de la EUPS, la tasa de erosión laminar histórica, 1970 al 2010, en el territorio del Estado de Durango se estimó en un rango de 0.02 a 163 ton ha⁻¹·año⁻¹, presentándose el valor más alto en la RH Sinaloa, justamente al noroeste del Territorio en la Sierra Madre Occidental (Figura 3).

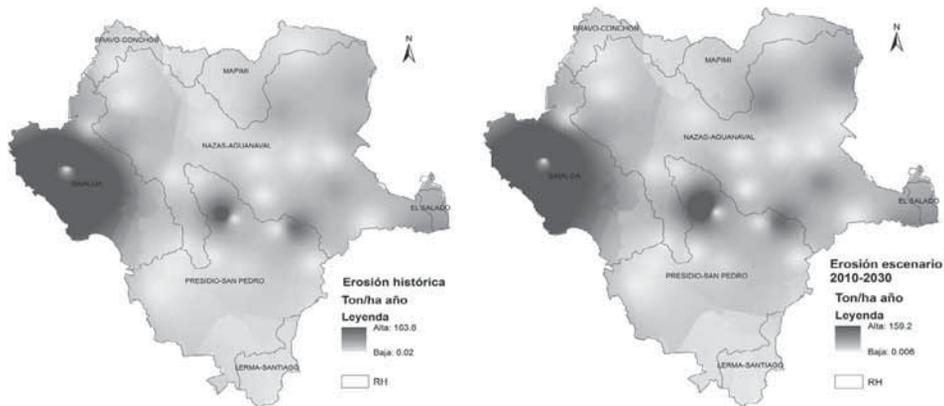


Figura 3. Tasa de erosión histórica y para el escenario 2010-2030 estimada por RH con base en la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE) para el Estado de Durango.

De acuerdo a los seis tipos de erosión descritos por Montes-León *et al* (2011), la tasa máxima del rango calculado ($160 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) para el Estado de Durango se identifica en el tipo 4 (de $150 \text{ a } 200 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$), la cual está efectivamente clasificada como alta para este caso; tasas cercanas a las reportadas por otros autores (Dueñez-Alanís *et al.*, 2006) en estudios realizados entre 1998 y 1999 en la localidad de la Hacienda Santa Bárbara (Durango, México) a 47 km por la carretera federal No. 40, Durango-Mazatlán, en la región forestal de la sierra Madre Occidental ($23^{\circ} 43' \text{ N}$ y $104^{\circ} 51' \text{ O}$).

Sin embargo, el efecto de menor lluvia en el promedio anual para el escenario 2010-2030 sobre la erosión laminar al compararlo con el histórico, indica por consecuencia una disminución para el rango más alto ($163.8 - 159.2 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) de erosión laminar de $4.6 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$; esto, es sin considerar cambios positivos o negativos en la vegetación o en la intensidad de la lluvia como se ha estimado por medio de estudios de variabilidad climática en relación a la lluvia de todo el País (Méndez *et al.*, 2008) y en particular para la Región del Pacífico Norte (García-Páez y Cruz-Medina, 2009) y temperatura y severidad de la sequías en Durango (Rivera *et al.*, 2007).

García-Páez y Cruz-Medina, (2009) mencionan que en la mayoría de las estaciones climatológicas de México se registra que más de 70% de la precipitación anual se da de mayo a octubre, y concluyen que el país se caracteriza por un régimen de precipitación estacional debido, entre otras causas, a la presencia de eventos climáticos tales como: El Niño, La Niña, el monzón mexicano, la oscilación decadal del Pacífico, huracanes y tormentas tropicales.

Al respecto, Magaña *et al.*, (2003) dicen que la ocurrencia y característica de El Niño/Oscilación del Sur (ENOS), es capaz de modificar los patrones normales del clima alrededor del mundo, y para México durante el invierno El Niño provoca que la precipitación aumente en el Noroeste, mientras que en el verano resulta en anomalías negativas de precipitación sobre la mayor parte del territorio mexicano; resultado en los que coinciden Pavia *et al* (2006) al analizar aproximadamente mil estaciones enclavadas en el territorio mexicano; quienes (Pavia *et al.*, 2006) encontraron que la influencia del ENOS produce anomalías estadísticamente significativas para

las lluvias de invierno y para las temperaturas de verano; fenómeno (ENOS) en el que coinciden varios autores (Heyerdahl & Alvarado, 2006; Magaña *et al.*, 2012) en el sentido de que afecta más directamente al territorio del Estado de Durango que La Niña, constituyéndose con ello en una señal importante para considerarlo como un predictor de clima.

Es importante considerar lo anterior, puesto que los suelos que pasan de uso forestal a uso pecuario poseen las características de incrementar la escorrentía superficial, la erosión del suelo y reducir la capacidad de infiltración en contraste con los suelos forestales sujetos a aclareos o cortas de regeneración (Dueñez-Alanís *et al.*, 2006; Kumar *et al.*, 2011), puesto que una menor disponibilidad de humedad en el suelo tendrá como consecuencia un incremento en la vulnerabilidad del suelo a la erosión eólica.

Conclusiones

La fragilidad o vulnerabilidad de los suelos del Estado de Durango fundamentalmente se debe más a una condición de exposición que de sensibilidad, ya que se deduce que por las características geomorfológicas, como son el relieve y las topoformas, lo colocan en una situación crítica considerando los rangos de clasificación para la erosión hídrica, al ocupar el lugar 4 de seis tipos de erosión propuestos en la literatura científica para el caso de México.

Si bien es cierto al considerar la precipitación (Pp) media anual probablemente se subestima el impacto de esta (Pp) en la erosión del suelo, y el efecto futuro en la vegetación y sequías derivadas de altas temperaturas, también es cierto que los modelos disponibles para estimar las tasas de erosión hídrica no lo consideran para periodos diferentes como podrían ser estacionales o mensuales; en cuyo caso habría que desarrollarlos conforme a la variabilidad climática demostrada ampliamente en la literatura científica, y descrita brevemente en el presente estudio.

Además de lo anterior, la capacidad de adaptación es un aspecto subvaluado al menos para el Estado de Durango, aun cuando las acciones y beneficios de dichos programas gubernamentales en el Estado de Durango, no fue posible integrarlos se sabe que el

manejo de los suelos y la conservación de los recursos naturales tiene una larga historia particularmente por ser parte fundamental de la economía del Estado, no solo para la producción de productos forestales, sino también para la ganadería extensiva que se asienta en las grandes praderas de gramíneas de la zona semiárida que se extiende de sur a norte en los valles centrales del territorio duranguense.

Referencias

- Becerra M. A. 1999. Escorrentía, erosión y conservación de suelos. 1ra ed. Ed. Universidad Autónoma Chapingo. 376 p.
- Bockheim J. G and A.N. Gennadiyev, 1999. The role of soil-forming processes in the definition of taxa in Soil Taxonomy and the World Soil. *Geoderma* 95: 53–72.
- Cárdenas M. J. 2010. Costos económicos del cambio climático en México, capítulo del libro México ante el Cambio Climático, evidencias, impactos, vulnerabilidad y adaptación. Compilado por María José Cárdenas. GREENPEACE, México. D.F. Pág.: 46-50.
- CNA, 1998). Cuencas Hidrológicas de México. Escala 1:250,000. México. Revisado (12/11/2009) In: <http://conabiweb.conabio.gob.mx/metacarto/metadatos.pl>
- Cotler Á. H., A. G. Pérez, N. L. González, C. E. Guadarrama, M. L. C. Fernández. 2010. Las cuencas hidrográficas de México diagnóstico y priorización. Primera ed. Pluralia Ediciones e Impresiones S.A. de C.V. México, D.F. 231 p. ISBN 978-607-7655-07-7
- Cotler H. A. 2007. Características y manejo de suelos en ecosistemas templados de montaña. INE-SEMARNAT. Revisado (22/06/2011) In: <http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/libros/395/cotler.html>
- Cuevas m. L, a. Garrido, j. L. D. Pérez y d. G. Lura, 2010. Cap. 20. Procesos de cambio de uso de suelo y degradación de la vegetación natural en: Las Cuencas Hidrográficas de México, diagnóstico y priorización, editado por Helena Cotler Ávalos, Arturo Garrido Pérez, Noemí Luna González, Carlos Enríquez Guadarrama, y María Luisa Cuevas Fernández. Pág. 96-103.
- Downing T. E., A. Patwardhan, R. J. T. Klein, E. Mukhala, L. Stephen, M. Winograd & G. Ziervogel. 2005. Cap 3. Evaluación de la Vulnerabilidad para la Adaptación al Clima. Cap del Libro: Adaptation Policy Frameworks for Climate Chang: Development Strategies, Policies and Measures. Primera edición 2005 publicada por Cambridge University Press. Pp 67-90.
- Dueñez-Alanís J., J. Gutiérrez, P. Luis, J. Navar. 2006. Manejo silvícola, capacidad de infiltración, escurrimiento superficial y erosión. *Terra Latinoamericana* Vol. 24, 2: 233-240.
- EMM, 2009. Enciclopedia de los Municipios de México. Estado de Durango. In: <http://www.e-local.gob.mx/work/templates/enciclo/durango/medi.htm>
- García-Páez F. y Cruz-Medina I .R. 2009. Variabilidad de la precipitación pluvial en la región pacífico norte de México. *Agrociencia* 43: 1-9. 2009.
- Heyerdahl E. K. and E. Alvarado. 2003. Influence of Climate and Land Use on Historical Surface Fires in Pine-Oak Forests, Sierra Madre Occidental, Mexico. Cap 7 del libro: Fire and Climatic Change in Temperate Ecosystems of the Western Americas. Pp 196-217. *Ecological Studies*, 2003, Volume 160, 2., 196-217, DOI: 10.1007/0-387-21710-X_7.
- INEGI, 2007. Conjunto de Datos Vectoriales Edafológico, Escala 1:250,000, Serie II, Cobertura Durango, claves: F13-02, F13-03, F13-05, G13-04, G13-05, G13-06, G13-07, G13-08, G13-09, G13-10, G13-11, G13-12.
- INEGI, 2009. Mapa de Regiones Hidrológicas del Estado de Durango. In: <http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/estados/dgo/rh.cfm?c=444&e=10>
- Kannan S. & Ghosh S. 2010. Prediction of daily rainfall state in a river basin using statistical downscaling from GCM output. *Environmental Research and Risk Assessment* 25 (4): 457-474.
- Kirkby, M. J. and Morgan, R.P.C. 1980. Erosión del Suelo. Primera ed. en Español, 1984. Ed. LIMUSA, México, D.F. 375 p.
- Kumar U. M., K. Ramachandran, K.L. Sharma, B. Satyam, K. Venkanna, M. U. Bhanu, M. Mandal, R. N. Masane. 2011. Assessing soil quality in a semiarid tropical watershed using a geographic information system. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 75:1144–1160.
- Magaña V. O., J. L. Vázquez, J. L. Pérez & J. B. Pérez. 2003. Impact of El Niño on precipitation in Mexico. *Geofísica Internacional* 42, 03: 313-330.
- Magaña V., D. Zermeño, C. Neri, 2012. Climate change scenarios and potential impacts on water availability in northern Mexico. *Clim Res*, Vol. 51: 171–184, 2012. Revisado (3/03/2012) In: <http://www.int-res.com/abstracts/cr/v51/n2/p171-184/> doi: 10.3354/cr01080
- Medellin M. P. 2002. Agenda Pendiente IV, USO DEL SUELO. Diario de San Luis, Sección Ideas, pág. 40, 14 nov de 2002.
- Méndez G. J., J. J. Ch. Navar, H. R. González, T. G.

- Treviño, 2007. Teleconexiones del fenómeno ENSO a la precipitación mensual en México. *Ciencia UANL*. X, 3: 290-298.
- Mikhailova, E. A., R. B. Bryant, S. J. Schwager, and S. D. Smith. 1997. Predicting rainfall erosivity in Honduras. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61:273-279.
- Montes-León M. A., E. M. Uribe-Alcántara, E. García-Celis. 2011. Mapa de Erosión Potencial. *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. II, 1: 5-17.
- Morgan, R. P. C. 1986. *Soil Erosion and Conservation*. Ed. Longman Scientific and Technical. Hong Kong. 298 p.
- Pavia E. G, F. Graef & J. Reyes. 2006. PDO-ENSO Effects in the climate of Mexico. *Journal Of Climate*, 19, December: 6433-6438.
- Renard K. G., G. R. Foster, G.A. Weeises, D. K. Mccool & D. C. Yoder. 1997. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE). *Agriculture handbook Number 703*. Washington, D.C. USDA-ARS.
- Rivera del R. R., G. P. Crespo, R. A. Ramírez, A. Q. Nolasco. 2007. Comportamiento espacio temporal de la sequía en el estado de Durango, México. *Terra Latinoamericana* 25: 383-392.
- SAGARPA, 2011. Programas y planes para atender zonas agropecuarias y/o afectadas por sequía. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación, Subsecretaría de Desarrollo Rural. Memoria del Foro Binacional (México-USA) sobre Desertificación y Sequía en relación con el Cambio Climático. Zacatecas, 10-12 de agosto de 2011.
- Santacruz D. G. 2011. Estimación de la erosión hídrica y su relación con el uso de suelo en la cuenca del río cahoacán, chiapas, México. *Aqua-LAC*. 3, 1: 45-54.
- SARH-SPP-CP, 1991. Manual de Conservación de Suelos y Agua. Tercera ed. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.
- SEDCO, 2009. Secretaría de Economía del Estado de Durango. <http://www.promociondurango.gob.mx/geografica.html>
- SEMARNAT, 2005. Informe de la Situación del Medio Ambiente en México, capítulo 3 Suelos. Dirección General de Estadística e Información Ambiental, Secretario de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Revisado (20/05/2011) In: http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_04/03_suelos/index_suelos.html
- Simonson W. R. 1997. Early teaching in USA of Dokuchaiev factors of soil formation. *Soil Sci. Am. J.* 61: 11-16.
- Thompson, I., Mackey, B., McNulty, S., Mosseler, A. 2009. Forest resilience, biodiversity, and climate change. A synthesis of the biodiversity/resilience/stability relationship in forest ecosystems. Secretariat of the Convention on Biological Diversity, Montreal. Technical Series no. 43, 67 p.
- Torres-Rojo J.M. 2011. La Estrategia Nacional de Manejo Sustentable de Tierras y las acciones de la Comisión Nacional Forestal. Memoria del Foro Binacional (México-USA) sobre Desertificación y Sequía en relación con el Cambio Climático. Zacatecas, 10-12 de agosto de 2011.
- UN-AGENDA 21. 1992. Cumbre de la Tierra, Programa 21. Programa de Acción de las Naciones Unidas de Rio. UN Department of Economic and Social Affairs, Division for sustainable Development. Revisado (03/06/2011) In: http://www.un.org/esa/dsd/agenda21_spanish/
- Vázquez A. J. L. 2010. Guía para el cálculo y uso de índices de cambio climático en México. Instituto Nacional de Ecología-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (INE-SEMARNAT). Desarrollada en el marco del Proyecto: Fortalecimiento de capacidades en detección de cambio climático en México. 88 p.