

# Identificación de áreas críticas de erosión en el Curso Alto del Río Lerma

Marivel Hernández Téllez\*, Juan Antonio García Aragón\*,  
Emannuelle Quentin\* y Carlos Díaz-Delgado\*

Recepción: 6 de septiembre de 2007

Aceptación: 5 de septiembre de 2008

\*Centro Interamericano de Recursos del Agua,  
Facultad de Ingeniería Universidad Autónoma  
del Estado de México, México.

Correo electrónico: mhernandezt@uaemex.mx;  
jgarciaa@uaemex.mx; equentin@uaemex.mx;  
cdiazd@uaemex.mx

**Resumen.** El Curso Alto del Río Lerma (CARL) tiene una extensión de 2 117.9 km<sup>2</sup>, presenta en su parte alta, el Volcán Nevado de Toluca, elevaciones de 4 560 msnm y en su parte baja la presa José Antonio Alzate una elevación de 2 569 msnm. La abrupta topografía, las altas precipitaciones y la intervención humana (tala de bosques y prácticas agrícolas inadecuadas), presentes en la cuenca, generan anualmente una importante pérdida de suelo. En este trabajo se identifican las áreas del CARL que producen mayor pérdida de suelo. Se hizo un esfuerzo para identificar los municipios más afectados con el fin de instarles a tomar medidas preventivas. Estos municipios corresponden a Santiago Tianguistenco, Lerma y Ocoyoacac que juntos representan 60% de las zonas con grado de erosión extrema. En índices de erosión alta a los anteriores se le suman Oztolotepec, Temoaya, Xalatlaco, Toluca en las faldas del Nevado y Zinacantepec.

**Palabras clave:** erosión, Lerma, RUSLE, precipitación, SIG.

## Identification of Critical Erosion areas in the Upper Course of the Lerma River

**Abstract.** The Upper Course of the Lerma River (CARL) has a surface of 2 117.9 km<sup>2</sup>, upper levels correspond to Nevado de Toluca Volcano 4 560 mosl and lower levels to Jose Antonio Alzate reservoir 2 569 mosl. The rugged topography, high rains and human intervention (logging and inappropriate crop practices), are the causes of a high soil loss. This work tries to identify the areas of the CARL watershed that yearly contributes the most to it. The municipalities where those areas belongs are identified in order to alert them to take preventive measures. Those municipalities are Santiago Tianguistenco, Lerma and Ocoyoacac which represents 60% of extreme erosion areas. With a high erosion index the municipalities of Oztolotepec, Temoaya, Xalatlaco, Toluca near the volcano and Zinacantepec area also added.

**Key words:** erosion, Lerma, RUSLE, precipitation, GIS.

## Introducción

La cuenca del Curso Alto del Río Lerma (CARL, ver figura 1) tiene una importancia particular en el contexto de la República Mexicana, pues allí nace el río Lerma en cuya cuenca se genera cerca del 20% del PIB (INEGI, 1998). En esta cuenca el proceso de erosión se presenta de forma natural dadas las características de la zona donde se encuentran fuertes pendientes y donde ocurren anualmente altas intensidades de precipitación (Antón y Díaz-Delgado, 2000, Díaz-Delgado *et*

*al*, 2003), sin embargo la intervención humana ha acelerado el proceso de pérdida de suelo. Por lo que esta investigación se ha centrado en realizar una evaluación de la pérdida de suelo, con el fin de identificar las zonas críticas de erosión, para lo cual se utilizó la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE) (Renard *et al*, 1997) en conjunto con el Sistema de Información Geográfica IDRISI (Eastman, 2006). De esa manera se ha logrado describir espacialmente la variación del tipo y uso de suelo, así como la distribución de los factores climatológicos que favorecen la erosión en el CARL.

### 1. Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada

RUSLE mantiene la estructura de su modelo predecesor, la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo USLE (Wischmeier y Smith, 1978). La ecuación se desarrolló como un método para estimar la pérdida promedio anual de suelo y puede servir también para los siguientes propósitos:

- a) Estimar la pérdida anual de suelo de una pendiente en una zona o cuenca con condiciones específicas de uso de la tierra.
- b) Servir como guía en la selección de sistemas de cultivo, manejo de prácticas de conservación para suelos y pendientes específicas.
- c) Estimar el cambio en la pérdida de suelo que resultaría de modificaciones en las prácticas de conservación sobre una zona específica.
- d) Simular escenarios para determinar cómo pueden aplicarse o alterarse las prácticas de conservación para permitir un cultivo más intenso.
- e) Estimar las pérdidas de suelo en áreas con uso de suelo distinto del agrícola.
- f) Obtener estimaciones de pérdida de suelo, en cantidad y ubicación, para que las autoridades correspondientes diseñen e implementen planes de conservación en la cuenca.

La ecuación universal de pérdida de suelo revisada (RUSLE), se representa mediante las siguientes variables:

$$A = (R)(K)(L)(S)(C)(P)$$

En donde:

*A* = Simboliza las pérdidas de suelo por unidad de área (ton/ha/año).

*R* = Factor de erosividad por precipitación pluvial. Cantidad de lluvia que cae durante un tiempo determinado y de escurrimiento cuando éste es significativo en el periodo bajo estudio [(MJ\*mm) / (ha\*hr)]\*año.

*K* = Factor de erodabilidad del suelo. Es función del tipo de suelo, como porcentaje de materia orgánica, estructura, permeabilidad del suelo, porcentaje de limos, arenas y arenas muy finas [(Ton\*hr) / (MJ\*mm)].

*L* = Factor de longitud de pendiente. Es la relación entre la longitud de la pendiente y la longitud de unidad parcela Standard (22.13 m).

*S* = Factor de gradiente de pendiente. Es la relación entre una pendiente de parcela standard 9% y la pendiente del terreno real en porcentaje.

*C* = Factor de manejo de cultivos. Corresponde al factor de labranza en relación con un determinado manejo de cultivos, teniendo en cuenta el tipo de cultivo. Valores entre 0 y 1 (adimensional).

*P* = Factor del método de control de erosión. Representa el factor de prácticas mecánicas de conservación del suelo. Valores entre 0 y 1 (adimensional).

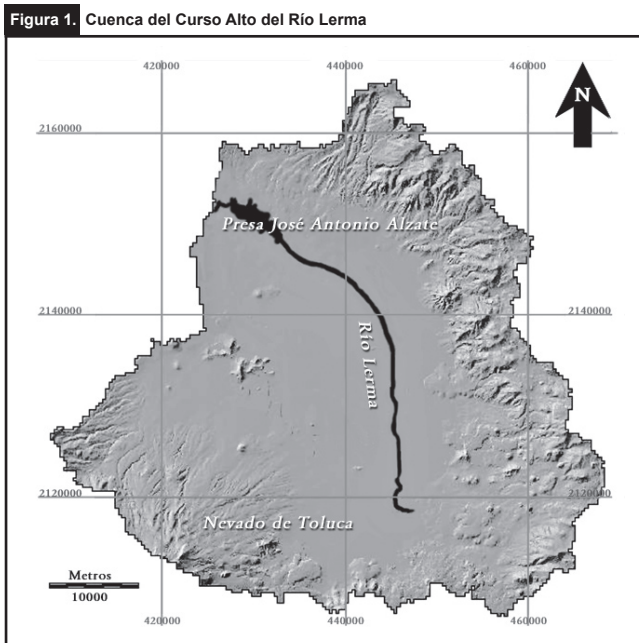
De los datos anteriormente mencionados, unos son atenuantes de la erosión, mientras otros son los que causan y facilitan el proceso erosivo. Dentro de los primeros se encuentran *C* y *P*, los cuales son manejables por el hombre para mitigar la pérdida de suelo y los segundos son *R*, *K*, *L* y *S*.

El factor *R* es una determinación de la erosividad como resultado de la precipitación pluvial, y se define como el producto de dos características de la lluvia tempestuosa: la energía cinética y la intensidad máxima durante 30 minutos (Hershfield, 1962), las cuales se calculan de la siguiente manera: El promedio anual de erosividad se calcula como la suma de la erosividad (*EI*<sub>30</sub>), que es el producto del total de la energía y la intensidad máxima de 30 minutos de las tormentas individuales.

La energía de la tormenta total se relaciona estrechamente con la cantidad de lluvia, y la intensidad máxima de 30 minutos es una medida de intensidad de lluvia máxima. La energía total para una tormenta se calcula empleando la siguiente expresión (USDA-Agricultural Research Service, 2003):

Cálculo de la unidad de energía

$$e = 0.29 (1 - 0.72 \exp^{-0.082i}) \tag{2}$$



En donde:

$e$  = Unidad de energía (MJ/ha\*mm).

$i$  = Intensidad de lluvia para una duración de treinta minutos con un periodo de retorno de dos años (mm/hr). Índice  $EI_{30}$  (Energía en intervalos) se calcula de la siguiente manera:

$$(EI_{30})_k = (P)_k(e)_k \tag{3}$$

En donde:

$EI_{30}$  = Erosividad de tormentas individuales [(MJ\*mm)/(ha\*hr)].

$P$  = Precipitación máxima para una duración de treinta minutos con un periodo de retorno de dos años (mm).

$e$  = Unidad de energía (MJ/ha\*mm).

$k$  = Estación en estudio.

La erosividad total se calcula con apoyo de la siguiente ecuación:

$$R_j = \frac{\sum_{j=1}^J (EI_{30})_j}{J} \tag{4}$$

En donde:

$R_j$  = Erosividad durante el año [(MJ\*mm/ha\*hr)\*año].

$j$  = Índice para cada tormenta.

$J$  = Número de tormentas por año.

Para determinar la precipitación de una hora con base en los datos diarios se utilizó el método de Hershfield (1962), el cual arrojó un factor de 0.6. Para obtener la lluvia de duración de treinta minutos y periodo de retorno 2 años, se emplearon la precipitación en una hora y periodo de retorno de 2 años ( $P_2^{60}$ ) de acuerdo con el método propuesto por Bell (1969).

$$P_T^t = (0.35LnT+0.76)(0.54t^{0.25}-0.50)P_2^{60} \tag{4.5}$$

En donde:

$P_T^t$  = Precipitación de duración  $t$  minutos y periodo de retorno  $T$  en años.

$P_2^{60}$  = Precipitación de duración 60 minutos (una hora) y periodo de retorno 2 años.

Para el factor de erodabilidad del suelo ( $K$ ), Wischmeier y Smith (1978), establecen que este factor en la ecuación es en realidad una descripción cuantitativa de las particularidades del suelo que han sido determinadas en forma experimental con base en la composición granulométrica del suelo y relacionándole con las características dimensionales de la unidad experimental,

mencionando que la unidad de longitud de parcela es aproximadamente de 22.13 m con una pendiente del 9% a lo largo y ancho.

Los suelos de textura áspera, como los suelos arenosos, tienen el valor de  $K$  bajo, debido al poco escurrimiento posible. Para suelos con textura mediana, el valor de  $K$  es moderado, porque son ligeramente susceptibles a la separación y producen un flujo moderado. Los suelos que tienen un alto porcentaje de sedimento fino son en la mayoría erosionables (Wanielista, 1993). Estos últimos suelos se encuentran fácilmente aislados; se localizan en la superficie expuesta al escurrimiento y producen proporciones altas de flujo. Los valores de  $K$  para estos suelos tienden a ser mayores a 0.30 (tabla 1).

Los efectos de la longitud y del gradiente de la pendiente se representan en  $RUSLE$  como  $L$  y  $S$  respectivamente, sin embargo a menudo se evalúan como un factor topográfico único,  $LS$  (Foster y Wischmeier, 1974). Es importante señalar que la longitud de la pendiente se define como la distancia desde el punto de origen del flujo sobre la superficie hasta el punto donde la pendiente disminuye lo bastante para que cese la erosión o hasta el punto en que el escurrimiento entra en un canal definido. El factor de la longitud de pendiente se define de la siguiente manera (Kirkby y Morgan, 1984):

$$L = \left( \frac{x}{22.13} \right)^m \tag{5}$$

**Tabla 1.** Indicaciones de la magnitud general del factor  $K$  de erodabilidad de un suelo.

Clase de textura	Contenido de materia orgánica		
	0.5 % $K$	2 % $K$	4 % $K$
Arena	0.05	0.03	0.02
Arena fina	0.16	0.14	0.10
Arena muy fina	0.42	0.36	0.28
Arena migajosa	0.12	0.10	0.08
Arena fina migajosa	0.24	0.20	0.16
Arena muy fina migajosa	0.44	0.38	0.30
Migajón arenoso	0.27	0.24	0.19
Migajón arenoso fino	0.35	0.30	0.24
Migajón arenoso muy fino	0.47	0.41	0.33
Migajón	0.38	0.34	0.29
Migajón limoso	0.48	0.42	0.33
Limo	0.60	0.52	0.42
Migajón arcilloso arenoso	0.27	0.25	0.21
Migajón arcilloso	0.28	0.25	0.21
Migajón arcilloso limoso	0.37	0.32	0.26
Arcilla arenosa	0.14	0.13	0.12
Arcilla limosa	0.25	0.23	0.19
Arcilla	0.13-0.29		

Fuente: M. J. Kirkby y R. C. P. Morgan (1984).

**Tabla 2. Estaciones pluviométricas del CARL y sus respectivas áreas de influencia.**

Nombre de la estación	Clave Clicom de la estación pluviométrica	Área de influencia (km <sup>2</sup> )
Almolya del Río	15004	253.9
Atarasquillo	15011	84.7
Calixtlahuaca	15203	61.1
Capulhuac	15014	52.0
Cerro de la Catedral	MX19	75.3
CNA Gerencia Toluca	15266	69.9
Colonia Álvaro Obregón	15312	74.1
EPCCA	15315	86.1
Observatorio CNA	15370	32.2
Hacienda de La "Y"	15030	35.8
La Marquesa	15045	163.9
Loma Alta	15229	42.6
Mexicalcingo	15056	64.6
Mimiapan	15057	117.2
Nevado de Toluca	15062	81.4
Nueva Oxtotitlán	15211	64.4
Nueva Santa Elena	15063	48.5
San Bernabé	15086	54.5
San Francisco T.	15089	37.0
San José El Contadero	15276	51.3
San Juan de las Huertas	15293	62.8
Temoaya	15119	89.8
Las Trojes	15201	54.9
Santín	SD1	81.9
Zacango	SD2	105.3
San Pedro Techuchulco	15105	74.9
Tenango del Valle	15222	97.5
Área total		2 117.9

**Tabla 3. Valores del factor de erosividad pluvial (R) para cada polígono de Thiessen.**

Clave Clicom	Nombre de la estación	Área (km <sup>2</sup> )	Área (%)	R por polígono [MJ*mm/ha*hr]
15004	Almolya del Río	253.9	12.00	
15011	Atarasquillo	84.7	4.00	235.4
15203	Calixtlahuaca	61.1	2.90	205.3
15014	Capulhuac	52.0	2.40	193.2
MX19	Cerro de la Catedral	75.3	3.50	268.2
15266	CNA Gerencia Toluca	69.9	3.30	259.4
15312	Colonia Álvaro Obregón	74.1	3.50	244.6
15315	EPCCA	86.1	4.10	219.8
15370	Observatorio CNA	32.2	1.50	260.2
15030	Hacienda de La "Y"	35.8	1.70	185.3
15045	La Marquesa	163.9	7.70	234.3
15229	Loma Alta	42.6	2.00	402.1
15056	Mexicalcingo	64.6	3.10	179.1
15057	Mimiapan	117.2	5.50	216.9
15062	Nevado de Toluca	81.4	3.80	249.6
15211	Nueva Oxtotitlán	64.4	3.00	287.2
15063	Nueva Santa Elena	48.5	2.30	167.5
15086	San Bernabé	54.5	2.60	222.0
15089	San Francisco T.	37.0	1.70	271.7
15276	San José El Contadero	51.3	2.40	208.8
15293	San Juan de las Huertas	62.8	3.00	110.2
15119	Temoaya	89.8	4.20	195.9
15201	Las Trojes	54.9	2.50	260.3
SD1	Santín	81.9	3.90	245.8
SD2	Zacango	105.3	4.99	225.4
15105	San Pedro Techuchulco	74.9	3.59	221.1
15122	Tenango del Valle	97.5	4.69	223.6
Suma		2 117.9	100.00	194.2

En donde:

$L$  = Factor de longitud de pendiente (adimensional).

$x$  = Longitud de pendiente ( $m$ ).

$m$  = Exponente empírico.

Las recomendaciones actuales (Wischmeier y Smith, 1978) para el exponente  $m$  son:  $m = 0.5$  si la pendiente es mayor a 5%,  $m = 0.4$  si esta es menor a 5% y mayor a 3%,  $m = 0.3$  si es menor a 3% y mayor a 1%, y  $m = 0.2$  si es menor a 1%.

## 2. Aplicación del método RUSLE en el CARL

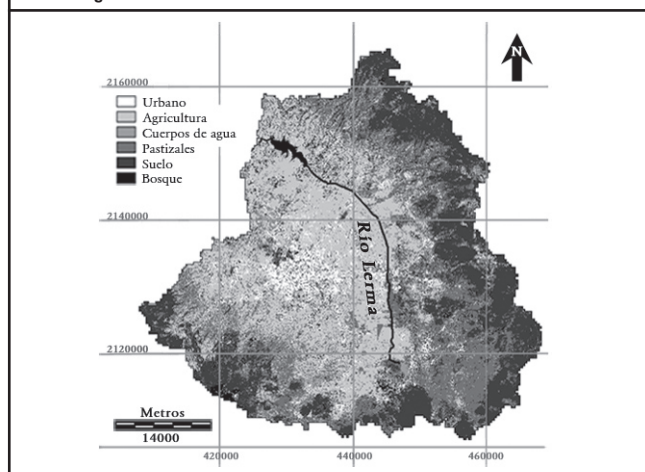
Bajo el empleo de la técnica de polígonos de Thiessen, se determinó el área de influencia correspondiente a cada estación pluviométrica en la zona de estudio (tabla 2). Cabe mencionar que los valores de precipitación para cada estación se obtuvieron del sistema ERIC (Quintas y Ramos 2000). Los valores de  $R$  se muestran en la tabla 3.

Para definir el factor  $C$ , debido a la clasificación de uso de suelo, se consideraron cinco tipos de usos en el CARL a los cuales se les asignó un factor  $C$  correspondiente. La tabla 4, muestra los valores de  $C$  utilizados y la figura 2 presenta el uso de suelo para el año 2000, obtenido mediante clasificación supervisada de la imagen de satélite Landsat 7 ETM+, para identificar las diferentes zonas en el CARL.

## 3. Resultados

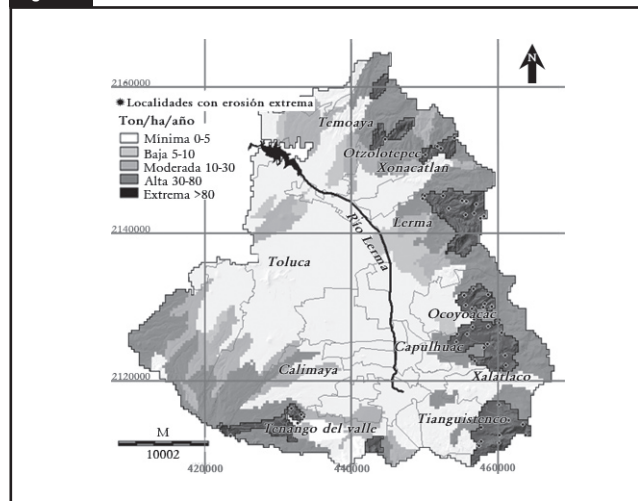
La tabla 5, resume el grado de erosión encontrado para cada uno de los municipios del CARL. El grado mínimo corresponde a valores de erosión menores de 5 ton/ha/año, el grado bajo de 5 a 15 ton/ha/año, el grado moderado de 15 a 30 ton/ha/año, el grado alto de 30 a 80 ton/ha/año y el grado extremo mayor de 80 ton/ha/año.

**Figura 2.** Usos de suelo en el CARL de acuerdo con la clasificación efectuada con la imagen de satélite Landsat7 ETM+ año 2000.



La figura 3 presenta la distribución espacial de las áreas del CARL según valores de erosión calculados con la ecuación RUSLE con ayuda del paquete SIG-IDRISI. Se puede observar que los valores más altos corresponden a municipios situados en las partes altas de la cuenca con pendientes de terreno mayores a 10%. Estas zonas concuerdan con los valores de *R* más altos (caso de Ocoyoacac en la estación La Marquesa). Igualmente corresponden a zonas que colindan con la frontera forestal. Es decir, son zonas recientemente deforestadas y hoy en día dedicadas a actividades agrícolas (ver figura 2 para el caso de Lerma, Temoaya, Otzolotepec y parte alta de Zinacantepec y Toluca en las estribaciones del Nevado de Toluca). En la tabla

**Figura 3.** Localización de áreas con diferentes valores de erosión en el CARL.



5 se puede comprobar que los municipios de Lerma, Santiago Tianguistenco y Ocoyoacac presentan entre ellos más del 60% de las áreas con grado de erosión extremo. Igualmente los municipios de Otzolotepec, Xalatlaco Temoaya, Toluca en la zona del Nevado y Zinacantepec presentan amplias áreas con grados de erosión alta.

**Tabla 4.** Valores (adimensionales) de *C* utilizados en las estimaciones de pérdida de suelo del CARL

Uso de suelo	Agricultura	Urbano	Bosques	C.a.	Pastizales
<i>C</i>	0.110	0.00	0.01	0.00	0.008

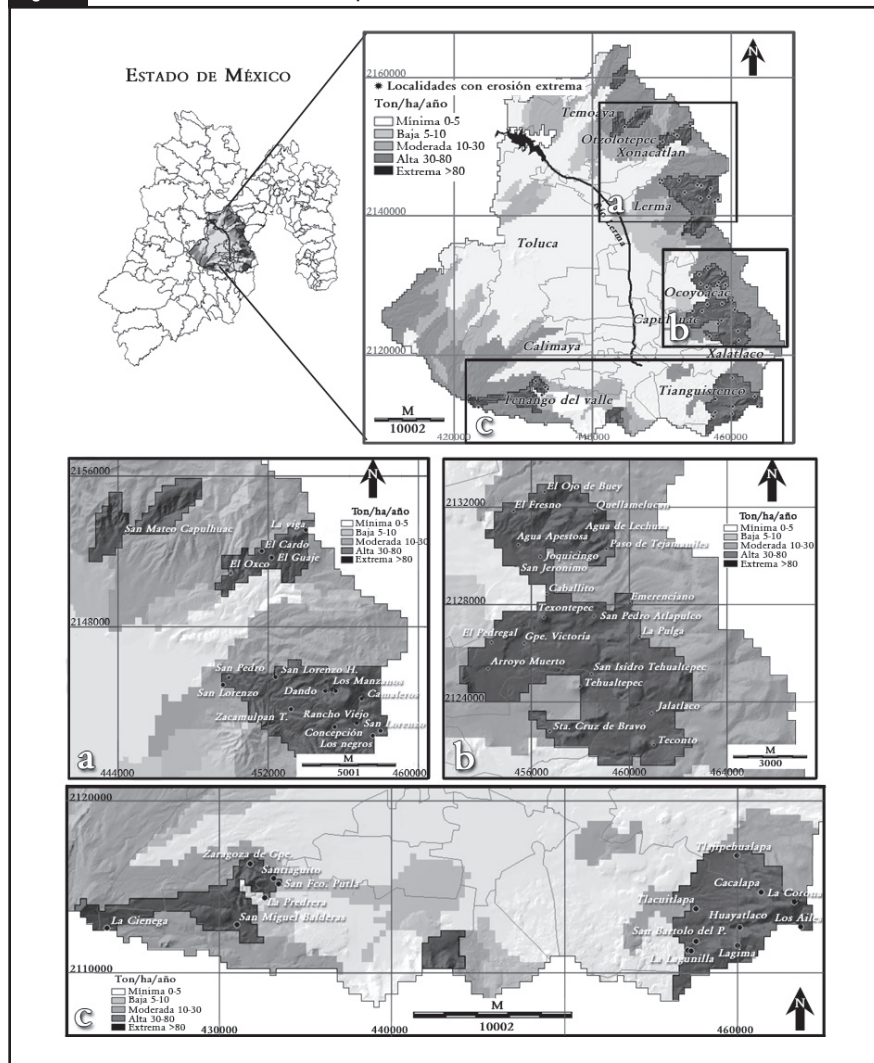
C.a.= Cuerpos de agua.

**Tabla 5.** Áreas en km<sup>2</sup> según grado de erosión en municipios del CARL.

Erosión	Lerma	Ocoyoacac	Capulhuac	Calimaya	Otzolotepec	Temoaya	T. V.	S.T	Xalatlaco	Zinacantepec	Xonacatlán	Toluca	Total
Mínima	54.00	34.00	16.00	59.00	36.00	70.00	33.00	73.00	37.00	55.00	37.00	257.00	761
%	7.10	4.47	2.10	7.75	4.73	9.20	4.34	9.59	4.86	7.23	4.86	33.77	100
Baja	31.00	7.00	—	—	1.00	14.00	—	—	—	5.00	—	14.00	—
%	43.06	9.72	—	18.00	1.39	19.44	—	—	—	6.94	—	19.45	100
Moderada	17.00	—	—	—	26.00	37.00	20.00	—	—	47.00	4.00	44.00	—
%	7.98	—	—	8.45	12.21	17.37	9.39	—	—	22.06	1.88	20.66	100
Alta	66.00	45.00	—	27.00	47.00	39.00	22.00	20.00	39.00	73.00	13.00	42.00	—
%	15.24	10.39	—	6.24	10.86	9.01	5.08	4.62	9.00	16.86	3.00	9.70	100
Extrema	40.00	34.00	6.00	5.00	13.00	5.00	18.00	37.00	16.00	—	7.00	1.00	—
%	21.98	18.68	3.30	2.75	7.14	2.75	9.89	20.33	8.79	—	3.84	0.55	100
Total afectada	208.00	120.00	22.00	109.00	123.00	165.00	93.00	130.00	92.00	180.00	61.00	358.00	1661
%	12.52	7.22	1.32	6.56	7.41	9.94	5.60	7.83	5.54	10.84	3.67	21.55	100

T.V. = Tenango del Valle.  
S.T. = Santiago Tianguistenco.

Figura 4. Localidades con erosión extrema que se localizan dentro del CARL.



Si se analiza el porcentaje de pérdida de suelo en las zonas de erosión alta y extrema se puede ver (tabla 6) que más del 75% de la pérdida se efectúa en esas áreas, las cuales no representan sino el 26% del área total de la cuenca. Es importante destacar que los municipios que presentan áreas de erosión extrema son Temoaya, Ocotlán, Xonacatlán, Lerma, Ocoyoacac, Capulhuac, Tianguistenco, Calimaya, Tenango del Valle, Toluca, Xalatlaco y dentro de dichas áreas se encuentran 53 localidades (figura 4). Lo cual coincide con lo reportado por De la Cruz (2008), ya que al modelar el riesgo de erosión en la cuenca, los municipios antes mencionados tienen un riesgo de erosión de media a alta.

Por otro lado, analizando únicamente las áreas de erosión extrema dentro del CARL, se identificaron claramente ocho polígonos (tabla 7 y figura 5). Entre estos polígonos el que mayor superficie presenta es el cinco (correspondiente a la imagen b de la figura 4), con una superficie de 5 515 ha, el cual ocupa un 26% de la superficie afectada con erosión extrema (figura 5). Los polígonos 4 (el mayor de la imagen a de la figura 4) y el 6 (el mayor de la imagen c de la figura 4) le siguen en segundo y tercer lugar, cubren una superficie de 4 469 ha y 3 934 ha, respectivamente (tabla 7). Los tres polígonos mencionados representan el 74% del área de erosión extrema.

Las actividades de restauración deben priorizar aquellas donde la erosión es mayor, por lo que el polígono cinco (figura 5), representa el área que

debería ser considerada en primera instancia para trabajos de recuperación de las áreas erosionadas.

Con objeto de validar los resultados obtenidos en este trabajo, éstos se compararon con los obtenidos por De la Cruz (2008), dicha autora aplicó el modelo “Estado de erosión del suelo” (Sundar *et al.*, 1997), que aunque dicho modelo no permite cuantificar las toneladas de erosión, sí permite modelar el riesgo de erosión en la cuenca y lo clasifica en área de erosión baja, media, alta. Así, los resultados de otras

Tabla 6. Porcentaje de la pérdida total anual de suelo en áreas de erosión alta y extrema.

Municipio	Lerma	Ocoyoacac	S.T.	Zinacantepec	Otzolotepec	Xalatlaco	T.V.	Temoaya	Toluca
%	15.29	11.80	9.64	8.03	7.86	7.45	6.06	5.19	4.96
% acumulado	15.29	27.09	36.73	44.76	52.62	60.07	66.13	71.32	76.28

S.T.= Santiago Tianguistenco.  
T.V. = Tenango del Valle.

Tabla 7. Polígonos con erosión extrema dentro del CARL.

No. Polígono	Superficie en ha	Porcentaje
1	457	2%
2	1 085	6%
3	915	5%
4	4 469	24%
5	5 515	29%
6	3 934	21%
7	2 052	11%
8	457	2%
Total	18 884	100%

investigaciones concuerdan en la identificación de los municipios mencionados con riesgo de erosión clasificados como media a alta. La figura 6 presenta los resultados de De la Cruz y en el mismo gráfico se superpusieron los resultados de este trabajo. Se puede comprobar que las áreas de erosión alta de De la Cruz (2008) corresponden a las que en este trabajo se han denominado como críticas.

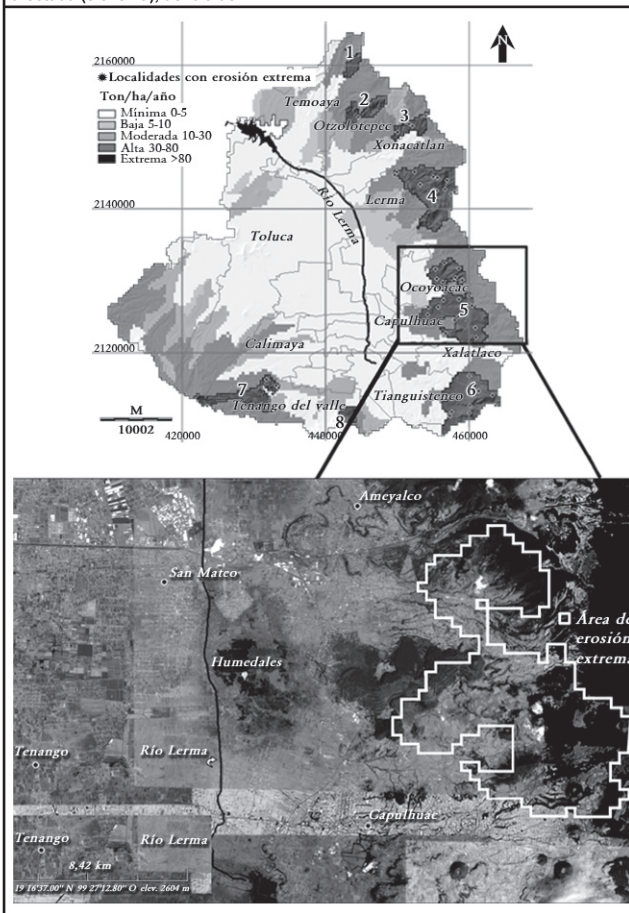
Igualmente se pueden validar los datos de este trabajo con las mediciones de azolve en el embalse José Antonio Alzate efectuadas por García-Aragón *et al.* (2005). En ese trabajo los autores demuestran que el promedio de azolve en el embalse Alzate, durante 43 años de vida del embalse, es de 480 000 m<sup>3</sup>/año. Los datos de este estudio demuestran que para las condiciones prevalecientes en esta década el volumen anual de producción de sedimentos es superior a los 2.6 hm<sup>3</sup>/año. Si se considera una capacidad de retención de sedimentos en el embalse Alzate de 70%, el volumen anual influyente en el embalse es de 690 000 m<sup>3</sup>/año. Esto arrojaría un factor de producción de sedimentos en el CARL de 0.28, el cual es un valor razonable para un tamaño de cuenca mediano como el que se analizó.

**Conclusiones**

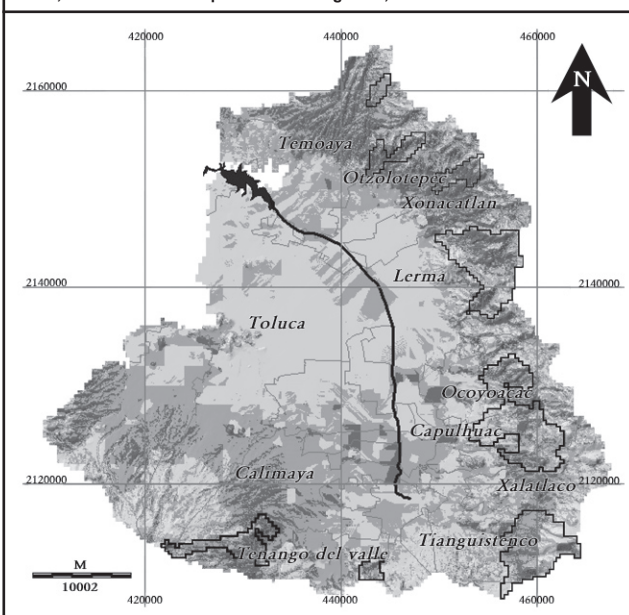
Por medio de técnicas que involucran sistemas de información geográfica (SIG), imágenes de satélite y la aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada se ha podido evaluar la pérdida de suelo en cada uno de los municipios de la cuenca del Curso Alto del Río Lerma.

Los municipios que presentan el mayor número de zonas con las más altas tasas de erosión coinciden con la presencia de varias localidades lo cual indica que la presencia humana puede estar influyendo de manera significativa en el proceso erosivo. Los municipios a los cuales se hace referencia son Lerma, Ocoyoacac y Santiago Tianguistenco, mismos que se encuentran en el parteaguas con el Valle de México donde se presentan los mayores valores de precipitación, no así las mayores elevaciones, las cuales corresponden al Nevado de Toluca. Adicionalmente, se pudo identificar que las áreas críticas de erosión coinciden con la frontera de la zona forestal. Los polígonos identificados como 4 y 5 son zonas prioritarias para actividades de conservación y prevención de la erosión. Se recomienda que en aras de lograr una reducción en los niveles de pérdida de suelo se intensifique la vigilancia a los talamontes en esas pocas zonas forestales que aún quedan en el CARL. Igualmente, se considera que la información aquí presentada es suficiente para la configuración de acciones de regeneración y conservación de suelos así como identificación de zonas

**Figura 5.** Localización del polígono de erosión extrema, con mayor superficie afectada (5 515 ha), dentro del CARL.



**Figura 6.** Área erosión baja, Área erosión media, Área erosión alta, según lo reportado por De la Cruz (2008), y Áreas de erosión crítica, encontradas en la presente investigación, mediante RUSLE.



que requieren ser reforestadas. Sin embargo, es importante resaltar que los datos que se presentan en este artículo reflejan magnitudes relativas. No se pretende cuantificar de manera exacta el volumen de producción de sólidos, puesto que los datos con que se cuenta, provenientes de imágenes de satélite, no se han podido verificar en su totalidad en el terreno. Por otro lado, es necesario destacar que los resultados han sido verificados y contrastados con los obtenidos en estudios paralelos de medición de azolve en el embalse Alzate, los cuales corroboran una erosión acelerada del CARL.

Así pues, el grado de deterioro por erosión que tiene la

cuenca requiere de la organización no sólo de los municipios que más sufren de pérdida de suelo, sino de todos aquellos circunscritos en esta unidad hidrológica. Sin duda alguna, el enfoque de solución que debe utilizarse es el de una Gestión Integrada de Recursos Hídricos. En efecto, no es sino bajo la concurrencia de voluntades y recursos reales de los actores involucrados (gobiernos y sociedad) que este tipo de problemas pueden ser resueltos. Finalmente la información aquí presentada es ampliamente suficiente para iniciar la elaboración de planes, programas y proyectos específicos para la mitigación de pérdida de suelo y control de erosión en la cuenca.

oblie

## Bibliografía

- Antón, D. y C. Díaz-Delgado (2000). Capítulo 9. *Un ejemplo de contaminación de aguas superficiales: el Curso Alto del Río Lerma, en Sequía en un mundo de agua*. Editorial Piriguazú Ediciones, Montevideo, Uruguay.
- Bell F. C. (1969). "Generalized Rainfall-Duration-Frequency Relationships, Proceedings of the ASCE", *Journal Hydraulics Division*. Vol. 95. Núm. Hy1.
- De la Cruz, J. M. (2008). *Evaluación del grado de erosión en la cuenca del río Lerma, Estado de México, mediante la aplicación del método Estado de la erosión del suelo (SES) y del modelo de Riesgo de degradación del suelo*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Geografía, UAEM, Toluca, México.
- Díaz-Delgado, C.; E. Quentin; P. Delgado; K. Bâ y M. V. Esteller Alberich (2003). *Atlas hidrológico digital del Curso Alto del Río Lerma*, Proyecto AGI YEA-UAEM, Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA), Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM), Toluca, México.
- Eastman, J. R. (2006). *IDRISI Andes, Guide to GIS and Image Processing*. Clark Labs, Clark University, Worcester, Massachusetts.
- Foster, G. R. y W. H. Wischmeier (1974). "Evaluating Irregular Slopes for Soil Loss Prediction", *Trans. Am. Soc. Agric. Engrs*, 17.
- García Aragón, J. A.; C. Díaz-Delgado; E. Quentin; P. Ávila; S. Tejeda y G. Zarazua (2006). "Capítulo 17. Problemática hidrosedimentológica del embalse José Antonio Alzate en el Edo. de México", Gutiérrez, A. P. A. Sánchez, J. Aparicio, J. F. Rivera, L. Díaz, R. Mejía y R. Val (eds.). *La medición de los sedimentos en México*. México.
- Hershfield, D. M. (1962). "Extreme Rainfall Relationships. Proceedings of the ASCE", *Journal Hydraulics Division*. Vol. 88, Núm. Hy6.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) (1998). *Carta de uso de suelos*. Sistema Nacional de información Estadística y Geográfica.
- Kirkby, M. J. y R. C. P. Morgan (1984). *Erosión de suelos*. Limusa, México.
- Quintas, I. y D. Ramos (2000). *Extractor rápido de información climatológica (ERIC II)*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), Servicio Meteorológico Nacional (SMN), México.
- Renard, K. G.; G. Foster; R. Weesies; G. A. Mccoll y D. K. Yoser (1997). "Predicting Soil Erosion by Water. "A Guide to Conservation Planning with the revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)", *Agricultural Research Service, Agricultural Handbook*, USDA. Washington, D.C., Núm. 703.
- Sundar, S. S.; K. Honda y S. Mural (1997). *Watershed Prioritization For Soil Conservation Planning With Mos-1 Messr Data*, Gis Applications And Socio-Economic Information A Case Study of Tinau Watershed, Nepal. GIS development.net.
- USDA-Agricultural Research Service (2003). *User's Guide Revised Universal Soil Loss Equation*. Version 2, Washington, D.C.
- Wanielista, M. P.
- \_\_\_\_\_. Y. A. Yousef (1993). *Stormwater Management*. John Wiley & Sons Inc., Nueva York, N. Y.
- \_\_\_\_\_. Smith D. D. y W. H. Wischmeier (1965). "Predicting Rainfall Erosion Losses from Cropland east of the Rocky Mountains", *Agriculture Handbook*, Núm. 282, ARS-USDA Washington, D.C.
- \_\_\_\_\_. (1978). "Predicting Erosion Losses A. Guide to Conservation Planning", *Agriculture Handbook Núm. 537*, USDA. Washington, D. C.