

EROSIÓN Y SEDIMENTACIÓN EN EL CURSO ALTO DEL RÍO LERMA, ESTADO DE MÉXICO. EROSION AND SEDIMENTATION IN THE UPPER COURSE OF THE LERMA RIVER, STATE OF MEXICO

Juan Antonio García Aragón¹, Carlos Díaz-Delgado¹,
Marivel Hernández Téllez¹ y Emannelle Quentin¹

RESUMEN

En este trabajo se presentan resultados conjuntos de diferentes estudios relacionados con la dinámica de sedimentos en la cuenca del Curso Alto del Río Lerma (CARL). La CARL tiene una extensión de 2117,9 km², presenta en su parte alta, el Nevado de Toluca, elevaciones de 4560 msnm y en su parte baja la presa José Antonio Alzate una elevación de 2569 msnm. La abrupta topografía, las altas precipitaciones y la intervención humana (tala de bosques y prácticas agrícolas inadecuadas) generan anualmente una importante pérdida de suelo. Por medio del Sistema de información Geográfico IDRISI y utilizando la ecuación universal revisada de pérdida de suelo (RUSLE por sus siglas en inglés) se evaluó este fenómeno en la CARL. Se hizo una comparación entre los valores obtenidos para 1973 y el año 2000. Lo anterior permitió evaluar la influencia del factor humano en la generación de sedimentos en la cuenca. Igualmente se efectuó un estudio batimétrico del embalse José Antonio Alzate lo cual permitió definir el factor de entrega de sedimentos de la cuenca.

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

ABSTRACT

Results of several studies of sediment dynamics in the Upper Course of the Lerma river (CARL), are presented in this article. The CARL has a surface of 2117,9 km², upper levels correspond to Toluca Volcano 4560 mosl and lower levels to Jose Antonio Alzate reservoir 2569 mosl. The rugged topography, high rains and human intervention (logging and inappropriate crop practices) are the causes of a high soil loss. Using the IDRISI geographic information system and the revised universal soil loss equation (RUSLE) the soil loss of the CARL basin was evaluated. A comparison between production in 1973 and 2000 was performed. The influence of human factor was unveiled in the production of sediments. Also a bathymetric campaign was developed in the Jose Antonio Alzate at the basin exit which allowed the definition of the sediment delivery ratio of the CARL basin.

Key words: erosion, IDRISI, 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) y es por lo tanto una de las más importantes del país. La intervención humana ha acelerado el proceso de pérdida de suelo de la cuenca. Este proceso se presenta de forma natural dadas las características de la zona donde se encuentran fuertes pendientes y altas intensidades de precipitación (Antón y Díaz-Delgado, 2000, Díaz-Delgado *et al.*, 2001). Por lo que el objetivo de la presente investigación fue realizar una evaluación de la pérdida de suelo durante el periodo de operación del embalse José Antonio Alzate el cual acumula la mayor parte de la producción de sedimentos de la CARL. Para el efecto se utilizó la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada, RUSLE (Renard *et al.*, 1997) en conjunto con el paquete de Sistemas de Información Geográfica IDRISI (Eastman, 2006). De esa manera

se pudo describir de manera espacial como varía el uso y tipo del suelo así como la distribución de los factores climatológicos que afectan la erosión en el CARL. La cuenca ha sufrido un acelerado proceso de desarrollo, urbanización y deforestación lo cual ha afectado la producción de sedimentos. Como consecuencia del temblor del año 1985 hubo un desplazamiento poblacional hacia la CARL. Con el fin de dilucidar el efecto de esta intervención humana se utilizaron imágenes de satélite LANDSAT MSS y ETM de 1973 y del año 2000. Lo anterior permitió definir el cambio en el uso de suelo de la CARL y con ello calcular la producción anual de sedimentos con condiciones para los años 1973 y 2000.

Igualmente durante el verano del año 2004 se efectuó un estudio batimétrico del embalse José Antonio Alzate que se encuentra en el exutorio de la CARL y es por lo tanto un punto de control de la entrega de sedimentos de la cuenca. La relación entre la pérdida de suelo durante la vida útil del embalse (41 años hasta el año 2004) y la acumulación de sedimentos

¹ Centro Interamericano de Recursos del Agua, FI-UAEM, Cerro de Coatepec, CU, Toluca, Edo. de México, 50130, México, e-mail:jagarciaa@uaemex.mx

en el embalse en ese mismo periodo permitió definir la relación de entrega de sedimentos (sediment delivery ratio SDR) en ese periodo.

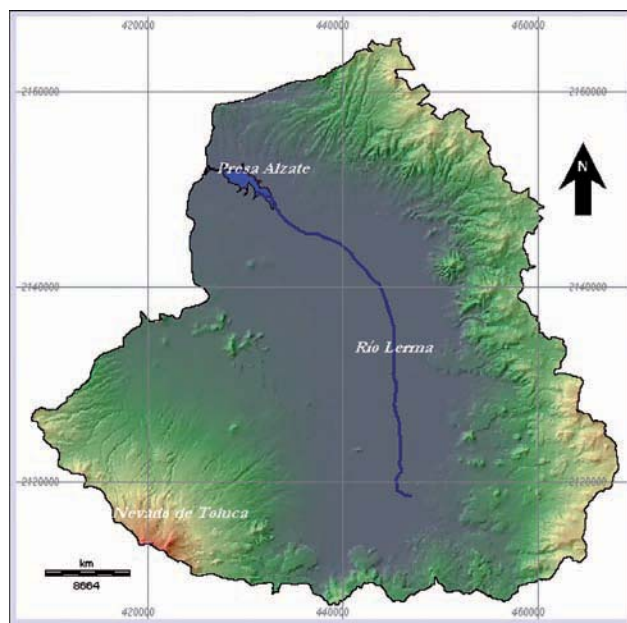


Figura 1. Cuenca del Curso Alto del Río Lerma (CARL)

MATERIALES Y MÉTODO

A- Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE)

RUSLE contiene la estructura de su 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.

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

$$A = (R)(K)(L)(S)(C)(P) \quad (1)$$

En donde:

A, son las pérdidas de suelo por unidad de área (ton / ha/año).

R, es el factor de erosividad por precipitación pluvial. Es la cantidad de lluvia que cae durante un tiempo determinado y de escurrimiento cuando éste es significativo en el periodo bajo estudio [(MJ*mm) / (ha*h)]*año.

K, es el factor de erodabilidad del suelo. Se define en función del tipo de suelo, como porcentaje de materia orgánica, estructura, permeabilidad del suelo, porcentaje de limos, arenas y arenas muy finas [(Ton*h) / (MJ*mm)].

L, es el factor de longitud de pendiente. Es la relación entre la longitud de la pendiente y 22,13 m (longitud de unidad parcela standard).

S, es el factor de gradiente de pendiente. Es la relación entre una pendiente de parcela standard 9 % y la pendiente del terreno real en porcentaje.

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

P, es el 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 de erosividad por precipitación pluvial en RUSLE es el índice de erosión de la precipitación pluvial. El factor *R* es una definición 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_{30}), 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

$$e = 0,29 \left(1 - 0,72 \exp(-0,082i) \right) \quad (2)$$

En donde:

E, es la unidad de energía (MJ / ha*mm).

I, es la intensidad de lluvia para una duración de treinta minutos con un periodo de retorno de dos años (mm/h)

Índice EI_{30} (Energía en intervalos) se calcula de la siguiente manera:

$$(EI_{30})_K = (P)_K (e)_K \quad (3)$$

En donde:

EI_{30} , es la erosividad de tormentas individuales [(MJ*mm) / (ha*h)].

P , es la precipitación máxima para una duración de treinta minutos con un periodo de retorno de dos años (mm)

E , es la unidad de energía (MJ / ha*mm)

K , es la estación en estudio.

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

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

En donde:

R_j , es la erosividad durante el año [(MJ*mm / ha*h)*año].

EI_{30} , es la erosividad de tormentas individuales (MJ*mm / ha*h).

j , es el índice para cada tormenta.

J , es el número de tormentas por el 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 utilizó la precipitación en una hora y periodo de retorno de 2 años, (P_2^{60}) de acuerdo con el método propuesto por Bell (1969).

$$P_T^t = (0,35 \ln T + 0,76) (0,54 t^{0,25} - 0,50) P_2^{60} \quad (5)$$

En donde:

P_T^t , es la precipitación de duración t minutos y periodo de retorno T en años.

P_2^{60} , es la 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 una descripción cuantitativa experimentalmente determinado por las particularidades del suelo. Depende tanto de su composición como las medidas de la unidad experimental, mencionando que la unidad, parcela, es aproximadamente de 22,13 m² 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 se encuentran fácilmente aislados; se localizan en la corteza y producen proporciones altas de flujo. Los valores de K para estos suelos tienden a ser mayores que 0,30.

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

Clase de Textura	Contenido de materia orgánica		
	0,5 %	2 %	4 %
	K	K	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: Kirkby y Morgan, 1984.

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). 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 ocurra 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):

$$L = \left(\frac{x}{22,13} \right)^m \quad (6)$$

En donde:

L , es el factor de longitud de pendiente.

X , es la longitud de pendiente, en metros.

M , es un exponente empírico.

Las recomendaciones actuales (Wischmeier y Smith, 1978) para el exponente m son: $m = 0,5$ si la pendiente $\geq 5 \%$, $m = 0,4$ si esta es menor a 5% y mayor

a 3 %, $m = 0,3$ si es $\leq 3\%$ y $\geq 1\%$, y $m = 0,2$ si es $< 1\%$.

B. Batimetría del embalse José Antonio Alzate.

El estudio batimétrico del embalse José Antonio Alzate fue realizado con una estación total de topografía durante el periodo de estiaje, donde el embalse se encontraba en sus niveles más bajos. La cuadrilla topográfica que llevó a cabo el estudio utilizó la técnica de una poligonal abierta geográficamente referenciada y la toma de puntos aleatorios que cubrieron satisfactoriamente todo el cuerpo del embalse Alzate. Para las zonas en donde aún se encontraba agua fue necesario utilizar embarcaciones pequeñas para cubrir correctamente todas las zonas del embalse.

Cabe mencionar que también se contó con la topografía original del año de 1959 utilizada para la definición del sitio de construcción de la cortina del embalse Alzate. El análisis de estos dos conjuntos de información batimétrica se llevó a cabo utilizando principalmente el paquete de SIG Idrisi (Eastman, 2006). El plano topográfico de 1959 escala 1:20 000 fue digitalizado y procesado en el paquete de SIG Idrisi con la finalidad de obtener las curvas de capacidad de almacenamiento versus niveles de inundación y área inundada versus elevación del nivel de agua.

La batimetría actual fue directamente obtenida por interpolación lineal con base en las curvas de niveles obtenidas de la cuadrilla de topografía que realizó los trabajos de campo.

Es importante subrayar, que fue necesario llevar a cabo un arduo proceso de ubicación geográfica y de acoplamiento de capas entre las dos temporalidades de la información batimétrica. Lo anterior debido a que el primer plano no contaba con coordenadas geográficas, sino geométricas.

Este proceso de acoplamiento fue realizado dentro del paquete Idrisi con base en el proceso de remuestreo (resample) y considerando la esperanza matemática de la ubicación del cuerpo del embalse con base en los ejes principales de los rasgos morfológicos de las dos batimetrías disponibles, además de considerar la cartografía digital del INEGI (1998) con escala 1:50000 y una imagen de satélite del año 2000 que corresponde al cuerpo del embalse Alzate. Es importante mencionar que el proceso de remuestreo (resample) lleva a cabo una restauración geométrica de las imágenes, especialmente en el caso de las imágenes captadas por sensores remotos las cuales, en su estado crudo, se encuentran sin coordenadas reales. Este proceso se utiliza para georegistrar una imagen o archivo vectorial en un sistema de referencia o en otro archivo. Este proceso toma las coordenadas de una serie de puntos de control en un archivo existente y en el nuevo sistema de referencia deseado, y convierte el archivo al nuevo sistema de referencia por medio de

una función cartográfica polinomial lineal, cuadrática o cúbica. (En el caso de imágenes satelitales, es suficiente un remuestreo simple lineal en la mayoría de las instancias). Con las imágenes satelitales (raster), las celdas de la nueva retícula rara vez coinciden de forma alguna con la retícula original. Por lo tanto, los nuevos valores de las celdas se estiman al remuestrear la retícula anterior (Eastman, 2006).

RESULTADOS

Bajo el empleo de la técnica de polígonos de Thiessen para obtener las áreas aferentes a cada estación climatológica existente en la cuenca, se calculó el área de influencia correspondiente a cada estación pluviométrica (Tabla 2). Los valores de precipitación para cada estación se tomaron del Sistema ERIC (Quintas *et al.*, 2000).

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

Nombre de la estación	Clave Clicom	Área aferente (km ²)
Almoleya 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 C. N. A.	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	2117,9

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

Clave Clicom	Nombre de la estación	Área (km ²)	%	R por Polígono [MJ*mm/ha*h]
15004	Almoloja del Río	253,9	12,0	235,4
15011	Atarasquillo	84,7	4,0	205,3
15203	Calixtlahuaca	61,1	2,9	193,2
15014	Capulhuac	52,0	2,4	268,2
MX19	Cerro de la Catedral	75,3	3,5	259,4
15266	CNA Gerencia Toluca	69,9	3,3	244,6
15312	Colonia Álvaro Obregón	74,1	3,5	219,8
15315	EPCCA	86,1	4,1	260,2
15370	Observatorio C. N. A.	32,2	1,5	185,3
15030	Hacienda de La "Y"	35,8	1,7	234,3
15045	La Marquesa	163,9	7,7	402,1
15229	Loma Alta	42,6	2,0	179,1
15056	Mexicalcingo	64,6	3,1	216,9
15057	Mimiapan	117,2	5,5	249,6
15062	Nevado de Toluca	81,4	3,8	287,2
15211	Nueva Oxtotitlán	64,4	3,0	167,5
15063	Nueva Santa Elena	48,5	2,3	222,0
15086	San Bernabé	54,5	2,6	271,7
15089	San Francisco T.	37,0	1,7	208,8
15276	San José El Contadero	51,3	2,4	110,2
15293	San Juan de las Huertas	62,8	3,0	195,9
15119	Temoaya	89,8	4,2	260,3
15201	Las Trojes	54,9	2,5	245,8
SD1	Santín	81,9	3,9	225,4
SD2	Zacango	105,3	4,99	221,1
15105	San Pedro Techuchulco	74,9	3,59	223,6
15122	Tenango del Valle	97,5	4,69	194,2
	Suma	2117,9	100,00	

Para definir el factor C de uso de suelo se definieron 5 clases de coberturas (Agricultura, Urbano, Bosques, Cuerpos de agua y Pastizales) en el CARL, a las cuales se les asignó un factor C correspondiente. La tabla 4, muestra los valores de C utilizados. Las figuras 4 y 5 presentan el uso de suelo para el año 1973 y 2000 respectivamente, obtenido mediante clasificación supervisada de las imágenes de satélite Landsat MSS y ETM+ (figuras 2 y 3).

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

Uso de suelo	Agri-cultura	Urba-no	Bos-ques	Cuerpos de agua	Pasti-zales
C	0,110	0,000	0,010	0,000	0,008

Las áreas de erosión encontradas y sus respectivos valores en ton/ha/año, se presentan en las figuras 6 y 7 para los años 1973 y 2000 respectivamente.

La siguiente tabla compara los datos de producción para cada periodo analizado

Tabla 5. Grados de erosión, extensión y porcentaje en la CARL en 1973

	Mínima (1-5 ton/ha/año)	Baja (5-10 ton/ha/año)	Mod-erada (10-30 ton/ha/año)	Alta (30-80 ton/ha/año)	Extrema (mayor a 80 ton/ha/año)
Km ²	1051	125	402	435	103
%	50	6	19	20	5

Tabla 6. Grados de erosión, extensión y porcentaje en la CARL en 2000

	Mínima (1-5 ton/ha/año)	Baja (5-10 ton/ha/año)	Mod-erada (10-30 ton/ha/año)	Alta (30-80 ton/ha/año)	Extrema (mayor a 80 ton/ha/año)
Km ²	1032	107	272	482	224
%	49	5	13	22	11

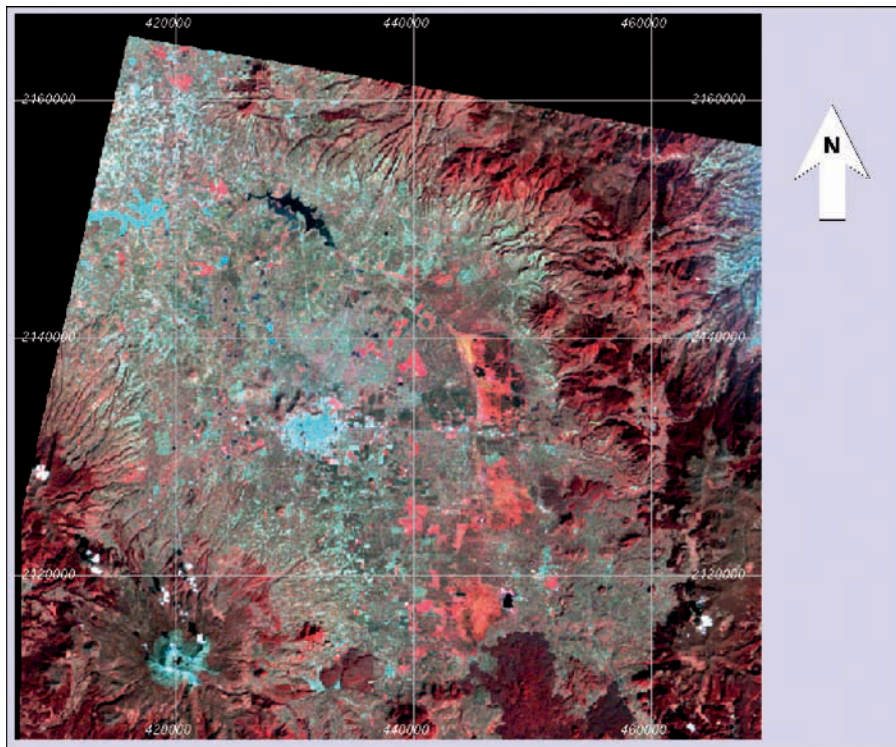


Figura 2. Imagen Landsat MSS de la CARL en 1973.

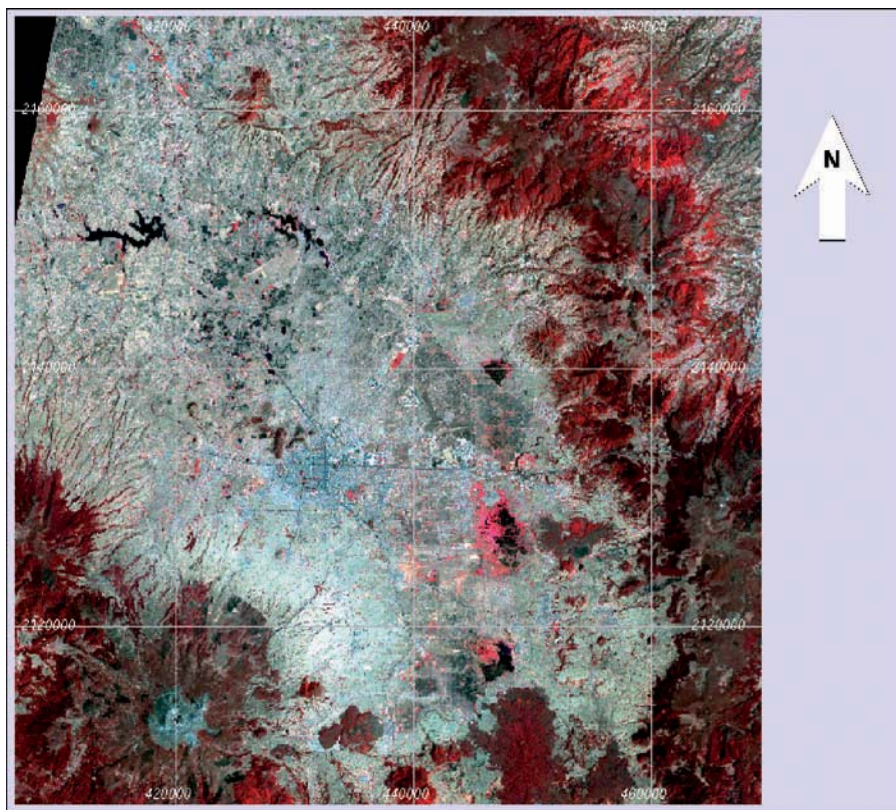


Figura 3. Imagen Landsat ETM de la CARL en el 2000.

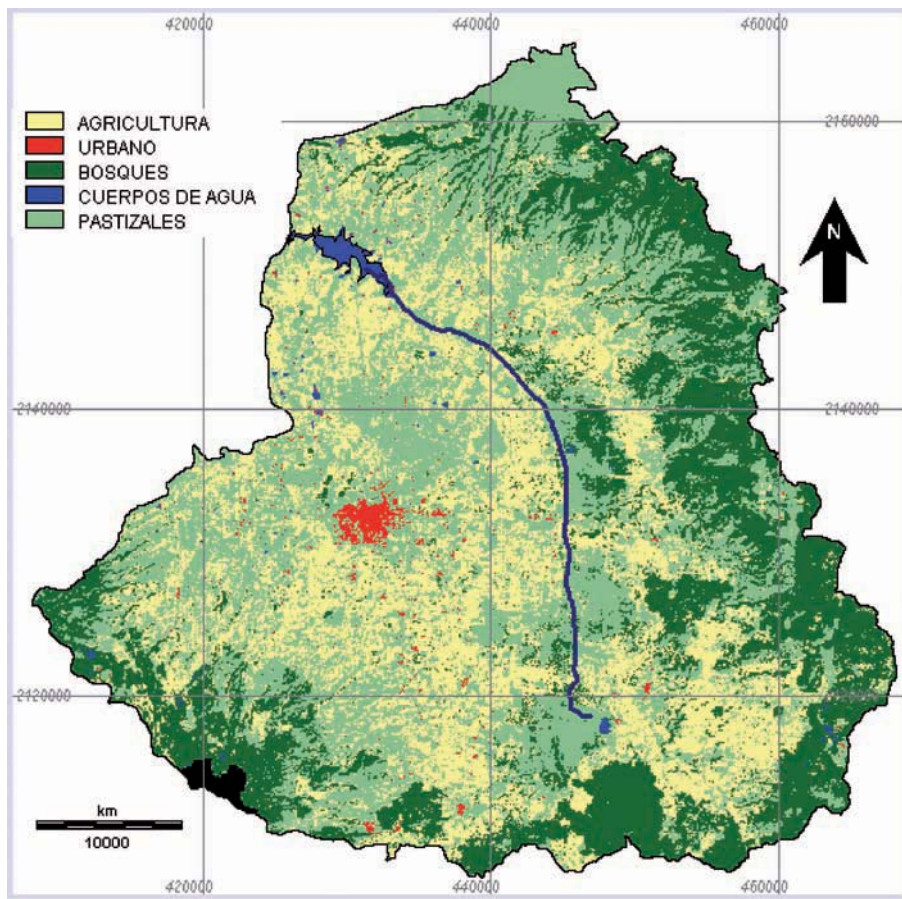


Figura 4. Uso de suelo en la CARL año 1973.

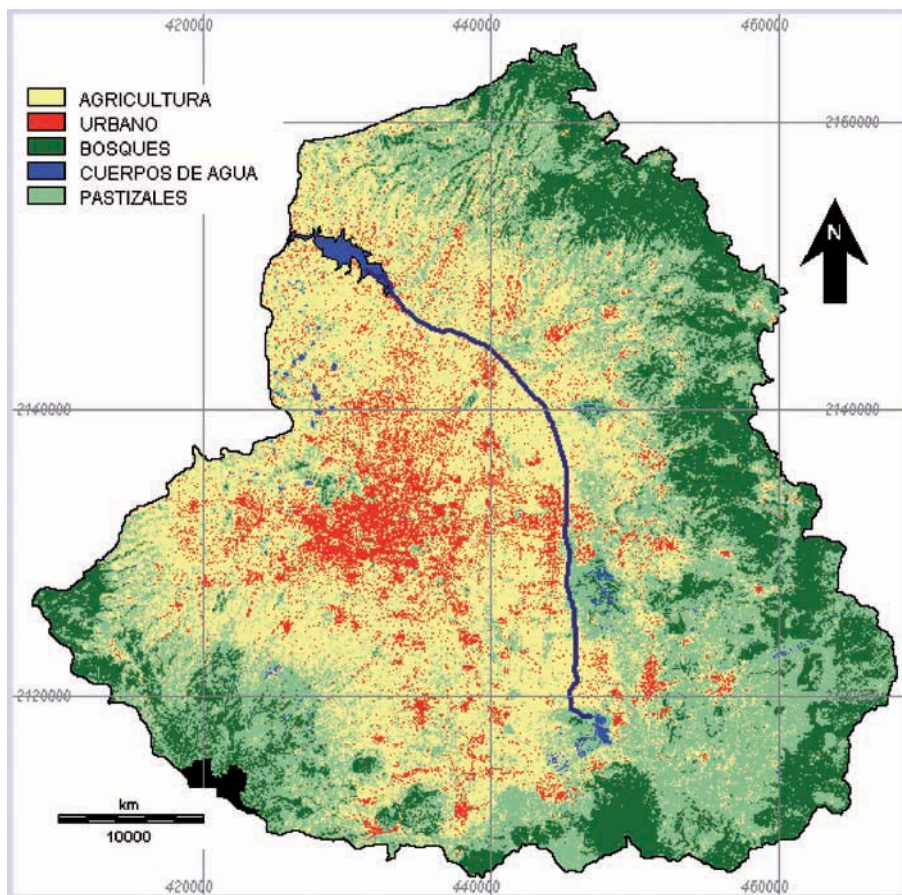


Figura 5. Uso de suelo en la CARL año 2000

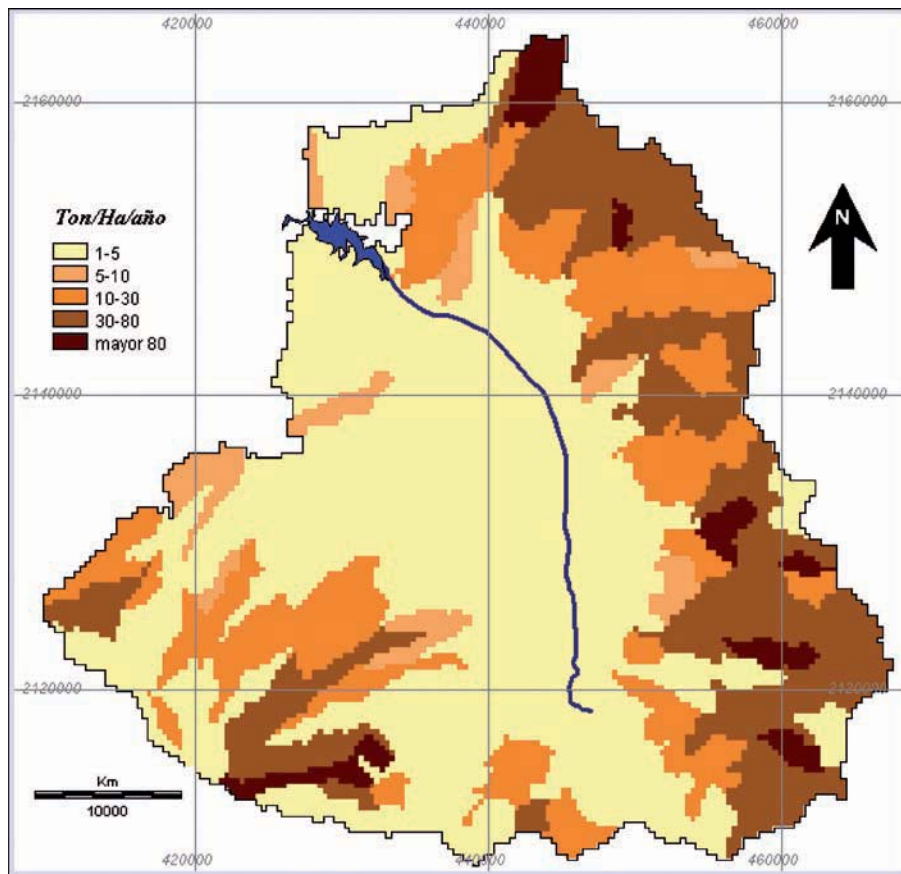


Figura 6. Pérdida de suelo en la CARL en 1973

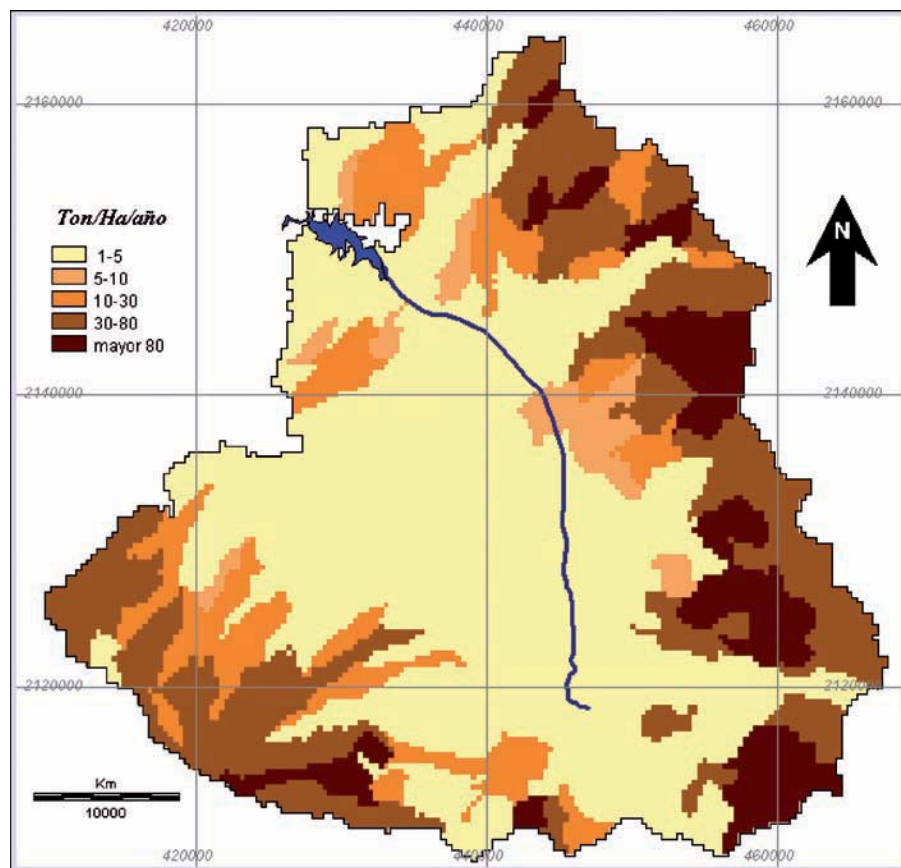


Figura 7. Pérdida de suelo en la CARL en 2000.

En las figuras 6 y 7 y tablas 5 y 6 se puede apreciar un aumento importante (6%) de las áreas de erosión extrema entre 1973 y 2000. La producción total en 1973 es de 4 580 000 ton/año aproximadamente lo que representa un volumen de 1 730 000 m³. Mientras que en el año 2000 esa producción se aumentó a 5 770 000 ton/año equivalente a 2 180 000 m³. Este aumento en la pérdida de suelo equivale a un 26%.

Para calcular la deposición de sedimentos en la CARL se efectuó un estudio batimétrico en el embalse José Antonio Alzate en el año 2004. Ese embalse capta

la mayor parte de los sedimentos generados en la cuenca. Estudios previos García-Aragón et al. (2006) han estimado una capacidad de retención media anual del embalse José Antonio Alzate de 75%. El volumen encontrado de deposición de sedimentos de acuerdo con la metodología antes descrita utilizando el software IDRISI es de 21 000 000 de m³ (tabla 3) en 41 años de vida del embalse (1963-2004). La figura 8 presenta las profundidades de los depósitos de sedimentos en las diferentes áreas del embalse y la tabla 3 permite efectuar las comparaciones de volúmenes iniciales y medidos en el año 2004.

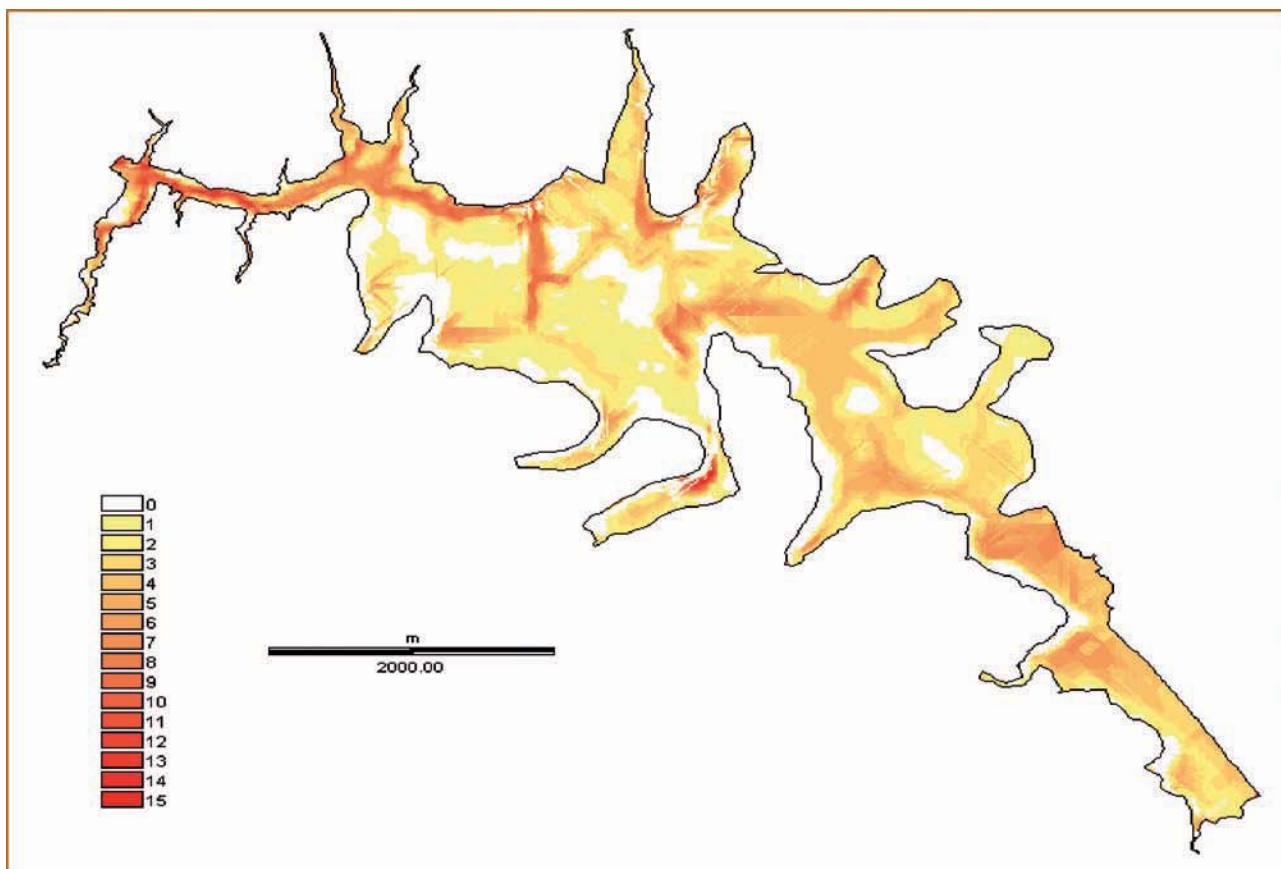


Figura 8. Profundidad de zonas de depósito de sedimentos en el embalse José Antonio Alzate en el año 2004.

Considerando la capacidad de retención del embalse de 75%, el volumen de sedimentos que se depositaron en el embalse más los que salieron del cuerpo de agua es de 28 000 000 m³ (28 hm³).

Para calcular el factor de entrega de sedimentos (SDR por sus siglas en inglés) en la CARL hay que efectuar una estimación de la pérdida total de suelo en los 41 años de funcionamiento del embalse. Para ello se asumió una variación lineal de la pérdida de suelo en base a las dos estimaciones con que se cuenta en este estudio 1973 y 2000. El SDR se calcula como la relación entre el volumen depositado (V_{acum}) en esos años en el embalse, afectado por la capacidad de retención (ret) y la sumatoria de los

volúmenes anuales de pérdida de suelo en los 41 años de vida del embalse analizados (ecuación 7)

$$SDR = \frac{V_{acum}}{\sum_{i=1}^{41} V_i} \quad (7)$$

La suma de los volúmenes de pérdida de suelo anual es de 80 000 000 m³ (80 hm³) en los 41 años de vida del embalse, y el volumen acumulado de sedimentos en el embalse se calculó en 21 000 000 m³ (21 hm³) por lo cual el SDR es de 0,35 en la CARL.

Tabla 7. Características del embalse Alzate originales (1959) y en el año 2004

Característica	Dato	Área inundada (ha)	Volumen de diseño (hm ³)	Volumen estimado con uso del SIG (hm ³)	
				1959	2004
Elevación corona de la cortina	2568,50 (msnm)				
Elevación aguas máximas	2566,92 (msnm)	1423,00	49,00	46,3	25,3
Elevación cresta del vertedor	2565,50 (msnm)	1049,00	35,30	32,6	11,6
Longitud del vertedor	282,00 (m)				
Gasto máximo normal en el vertedor	254,00 (m ³ /s)				
Elevación umbral obra de toma	2558,30 (msnm)	290,00	8,00	6,69	0,56
Gasto máximo normal obra de toma	20,00 (m ³ /s)				

El valor encontrado es relativamente alto, Walling 1983 establece un valor de referencia entre 0, 2 y 0,25 para cuencas grandes. Los estudios sin embargo se refieren a cuencas con poca intervención humana. Este no es el caso para la CARL durante el periodo estudiado.

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 la cuenca del Curso Alto del río Lerma durante 41 años de operación del embalse José Antonio Alzate.

Estudios paralelos de medición de azolve en el embalse Alzate permitieron encontrar el volumen acumulado de sedimentos depositados en ese mismo periodo.

Con la conjunción de esa información ha sido posible determinar que el factor de entrega SDR de sedimentos en al CARL es de 0,35. Este factor relativamente alto como reflejo de la intervención humana en la cuenca es de utilidad para estudios futuros de erosión en la CARL.

Es importante mencionar que una limitante del estudio presentado es que no fue posible efectuar verificación de los datos de uso de suelo en el terreno. A pesar de que revisiones en terreno son deseables, se considera que la información 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.

BIBLIOGRAFÍA

ANTÓN, D. Y DÍAZ-DELGADO, C. 2000. Capítulo 9. "Un Ejemplo de Contaminación de Aguas Superficiales: El Curso Alto del Río Lerma", del libro "Sequía en un Mundo de Agua". Editorial Piriguazú Ediciones, Montevideo, Uruguay. ISBN: 9974-7571-3-4.

BELL F. C. 1969. "Generalized Rainfall-Duration-Frequency Relationships", Proceedings of the ASCE, Journal Hydraulics Division, Vol. 95, No. Hy1, Paper 6357.

DÍAZ DELGADO, C.; QUENTIN, E.; DELGADO, P.; BÃ, K.; ESTELLER ALBERICH, M. V. 2003. "Atlas Hidrológico Digital del Curso Alto del Río Lerma", Proyecto CGIyEA-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, USA, 328 p.

FOSTER, G. R. Y WISCHMEIER, W. H. 1974. "Evaluating Irregular Slopes for Soil Loss Prediction". Trans. Am. Soc. Agric. Engrs, 17: 305-307.

GARCÍA ARAGÓN, J. A.; DÍAZ-DELGADO, C.; QUENTIN, E.; ÁVILA, P.; TEJEDA, S; Y ZARAZUA, G. 2006. Capítulo 17. "Problemática hidrosedimentológica del embalse José Antonio Alzate en el Edo. de México", del libro "La medición de los sedimentos en México" Editores: A. Gutiérrez, P.A. Sánchez, J. Aparicio, J. F. Rivera, L. Díaz, R. Mejía y R. Val ISBN: 968-5536-53-8 México.

HERSHFIELD, D. M. 1962. "Extreme Rainfall Relationships". Proceedings of the ASCE, Journal Hydraulics Division, Vol. 88, No. Hy6 : 73-92.

- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA, GEOGRAFÍA E INFORMÁTICA (INEGI) 1998. Carta de uso de Suelos.
- KIRKBY, M. J. Y MORGAN R.C.P. 1984. "Erosión de Suelos", LIMUSA, México, P. p. 35-82.
- QUINTAS, I.Y RAMOS, D. 2000. "Extractor Rápido de Información Climatológica (ERIC II)", Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), Servicio Meteorológico Nacional (SMN), México.
- RENARD, K. G.; FOSTER G.; R. WEESIES; MCCOLL G. A. Y YOSER. D. K. 1997. Predicting Soil Erosion by Water. "A Guide to Conservation Planning with the revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)". USDA, Agricultural Research Service, Agricultural Handbook Number 703.
- SUNDAR, S. S., HONDA, K. Y MURAI, S. 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 YOUSEF, Y.A. 1993. "Stormwater Management", John Wiley & Sons Inc., New York, N. Y., 565 p.
- WALLING, D.E. 1983." The sediment delivery problem". Journal of hydrology 65, 209-237.
- WISCHMEIER, W. H. Y SMITH D. D. 1965. "Predicting Rainfall Erosion Losses from Cropland east of the Rocky Mountains", Agriculture Handbook No. 282, ARS-USDA Washington, D. C.
- WISCHMEIER, W. H. Y SMITH D. D. 1978. "Predicting Erosion Losses A. Guide to Conservation Planning", Agriculture Handbook No. 537, USDA Washington, D. C.