

### III. Evaluación del riesgo a la erosión de suelo en la microcuenca del río Francés

Rodolfo Palacios-Silva,  
Sergio López-Mendoza y  
Alondra Gil-Ríos

#### Introducción

El estudio del riesgo que presenta un sistema a un fenómeno natural es una aproximación utilizada en muchas disciplinas científicas y tecnológicas, incluyendo en ellas a la Ingeniería Ambiental. El objetivo de este capítulo es mostrar una aproximación analítica que permite establecer el riesgo de erosión producida por la precipitación pluvial y la combinación de variables edafológicas, topográficas y de uso de suelo que se presentan en un paisaje en particular. El estudio fue realizado asumiendo un paralelismo entre la estimación de riesgo con la ecuación universal para estimar la pérdida de suelos (USLE, abreviación de las siglas en inglés por las que se conoce el modelo general: Universal Soil Loss Equation), extendiendo la USLE a una microcuenca utilizando un Sistema de Información Geográfica (GIS, abreviación de las siglas en inglés del concepto Geographic Information System). Hacia el final del capítulo se discute la validez y utilidad de aplicar este acercamiento metodológico para determinar áreas críticas dentro de la zona de estudio.

## Erosión del suelo

La erosión es el evento que determina la distribución espacio-temporal del suelo superficial porque regula el balance de dos procesos, la generación y la remoción del suelo. Las actividades humanas han modificado en muchas formas este balance natural porque suprimen la formación de suelo o aceleran su desplazamiento (la agricultura, las edificaciones, la deforestación, entre muchas otras). El suelo es un recurso natural no renovable en corto plazo, por lo que la recuperación de sus propiedades resulta difícil y costosa. En la actualidad, el cambio en el balance generación-remoción del suelo es considerado uno de los principales problemas ambientales.<sup>[1]</sup>

Se estima que alrededor de dos mil millones de hectáreas en el mundo (15% de la superficie terrestre) sufren algún tipo de degradación del suelo severa.<sup>[2]</sup> Es difícil asignar un costo de la degradación de la calidad edáfica porque el suelo proporciona una gran cantidad de bienes y servicios ambientales como el sostenimiento de la biodiversidad, la regulación del ciclo hidrológico, el reciclaje de nutrientes así como el amortiguamiento, la retención o transformación de sustancias contaminantes. Sin embargo, es posible dar una valoración económica de la erosión de suelo porque la degradación está inversamente relacionada con el nivel productivo de las áreas forestales o agrícolas. Para dar una magnitud del impacto de la pérdida del suelo cabe mencionar que en algunos países del sur de Asia se calcula que la disminución en la productividad del suelo representa la pérdida de siete mil millones de dólares al año,<sup>[3]</sup> mientras que en EU, la pérdida de productividad tiene un costo que alcanza los 44 mil millones de dólares por año.<sup>[4]</sup>

La mayoría de los estudios relacionados a la evaluación de la erosión del suelo se han realizado en países desarrollados. En América latina y otros países en desarrollo, el estudio de las causas y consecuencias de la erosión ha sido poco abordado a pesar que resulta un aspecto fundamental por la relación que tiene la calidad del suelo con la obtención de bienes y servicios ambientales.<sup>[5]</sup> El estudio de las causas y consecuencias ambientales de la erosión, así como las formas de mitigar su impacto negativo, es un reto que deberá ser atendido con celeridad para alcanzar la sostenibilidad del desarrollo social en futuras generaciones.

## Modelación del riesgo a la erosión de suelo por actividad pluvial

La erosión hídrica depende de cuatro factores: clima, suelo, vegetación, y topografía. El impacto del clima se relaciona con la cantidad y la intensidad de la lluvia.<sup>[6]</sup> Si la precipitación es mayor, la erosión potencialmente también puede ser mayor. Sin embargo, el tamaño de las partículas del suelo y su capacidad de retención, permeabilidad y contenido de agua son determinantes en la intensidad de la erosión.<sup>[7]</sup> Por ejemplo, si las partículas son más pequeñas o el suelo contiene más agua o la permeabilidad es baja entonces existe un mayor poder abrasivo. La vegetación por otro lado, también desempeña un papel importante; reduce el impacto mecánico de las gotas de agua al caer sobre el suelo y determina el flujo hídrico.<sup>[8]</sup> Los suelos desnudos son más susceptibles a la erosión que los suelos con cobertura vegetal. La influencia de la topografía a la erosión se asocia básicamente a la pendiente, cuanto mayor es la pendiente, mayor es el potencial para la erosión de agua.<sup>[9]</sup> Los cuatro factores mencionados anteriormente, en su conjunto, predicen el tipo de erosión y su magnitud.

La modelación numérica sintetiza los factores que producen la erosión en una ecuación. Para la erosión hídrica permite entender los procesos causales de la degradación de los suelos, evaluar local y regionalmente el impacto ya sea en zonas naturales o en sistemas productivos, e identificar las estrategias de control a la erosión.<sup>[10]</sup> En este contexto la modelación numérica permite evaluar las prácticas de conservación que buscan la reducción de la erosión de suelos.<sup>[10]</sup> Existen muchos tipos de modelos diferentes entre sí en su capacidad predictiva y aplicaciones que evalúan la pérdida de suelos como resultado de los procesos hidrológicos.<sup>[11]</sup> Básicamente los modelos se agrupan en empíricos (conjunto de ecuaciones empíricas) y analíticos (conjunto de ecuaciones que modelan la deposición de sedimentos). Generalmente los modelos empíricos son útiles para estudios a gran escala (temporal y espacial) y se distinguen también porque los datos necesarios para estimar sus parámetros son relativamente fáciles de obtener. Los modelos analíticos son más precisos y puntuales pero necesitan ser alimentados por una mayor cantidad de datos.<sup>[12]</sup>

El desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica (GIS) ha incrementado significativamente la aplicación de los modelos en la evaluación de la pérdida de suelos y el diseño de estrategias para su control.<sup>[13]</sup> El poder de esta herramienta radica en su capacidad para relacionar diferentes tipos de datos como imágenes de satélite, fotografías aéreas, además de muchas y diferentes fuentes de datos geográficos, así como su capacidad para la integración de datos con diferentes escalas. También, los GIS son una herramienta que facilita la toma de decisiones ya que permite evaluar cuantitativamente diferentes escenarios de manejo y mostrar en forma simple las estrategias de mitigación o conservación de suelos.<sup>[14]</sup>

Los mapas de riesgo a la erosión hídrica son evaluaciones del paisaje realizadas a partir del análisis espacial de datos climáticos, edáficos, topográficos y de uso de suelo. Las evaluaciones de riesgo plasmadas en mapas clasifican superficies del terreno en función del grado del riesgo en una unidad de territorio definida. Los métodos para la evaluación de riesgo fueron propuestos en 1970 y desde entonces, han evolucionado notablemente debido a la expansión del interés por el estudio de la erosión y los cambios ambientales asociados a la pérdida de la calidad de los suelos.<sup>[15]</sup> Actualmente, los mapas de riesgo generalmente involucran métodos de síntesis de variables de distinto tipo y de origen diferente.<sup>[13]</sup>

## Objetivos del capítulo

El uso de la tecnología ha proporcionado una herramienta muy importante para construir modelos de análisis más robustos en la evaluación de riesgo y también han servido para proporcionar información de fácil acceso a tomadores de decisiones. El presente estudio constituye un ejemplo de la utilización de dos herramientas, un modelo de erosión (USLE) y el GIS, para inferir el riesgo a la erosión del suelo. El enfoque principal del capítulo es que a través de la técnica GIS es posible tener una adaptación de la USLE a un área pequeña (delimitada como una microcuenca) y de esta forma se convierte en una herramienta de aproximación metodológica para determinar áreas susceptibles a la erosión edáfica en el paisaje.

## Zona de estudio

### Localización

La microcuenca del río Francés se localiza en los 16° 51' 29" y 16° 55' 00" Latitud Norte y 93° 17' 18" y 93° 27' 28" de Longitud Oeste. Pertenece a la cuenca Grijalva-Tuxtla Gutiérrez y por lo tanto a la región hidrológica Grijalva-Usumacinta. La zona de estudio presenta una intersección del 60% con el municipio de Berriozábal y del 40% con el municipio de Ocozocoautla de Espinosa. Tiene un tamaño de aproximadamente 13,380 ha y 78 km<sup>2</sup> de perímetro y su altitud varía entre los 660 hasta los 1230 msnm (figura 1). La microcuenca fue delimitada a partir del cono de deyección que se encuentra en la parte norte de la cuenca, sitio donde el río Francés, una corriente perenne poco caudalosa, se infiltra por varias decenas de pequeños sumideros (con un perímetro menor de 1.5 m) para convertirse en una corriente subterránea.

### Descripción del paisaje

En términos generales el clima de la región presenta una temperatura media anual que oscila entre los 22° y los 30°C, mientras que la precipitación media anual de la zona es de 1200 mm/año y se concentra temporalmente en el verano, otoño e invierno.<sup>[16]</sup>

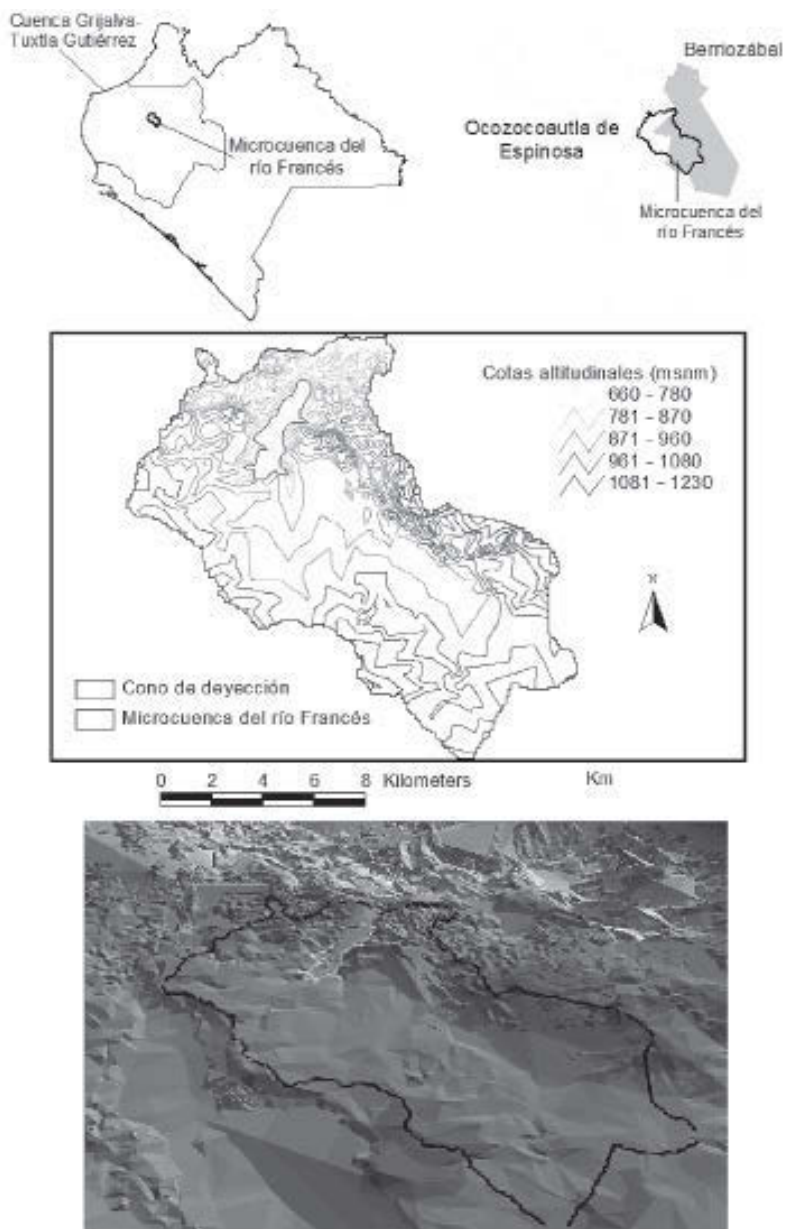


Figura 1. Localización y principales aspectos topográficos de la zona de estudio.

No se tiene un registro puntual de la precipitación, pero las dos estaciones meteorológicas más cercanas a la zona de estudio muestran que llueve aproximadamente 70 días al año, la precipitación generalmente es menor a los 10 mm y raramente excede los 80 mm de lluvia al día (cuadro 1), la variación temporal oscila entre los 600 a los 1800 mm anuales (figura 2).

Cuadro 1. Caracterización de la precipitación registrada en dos estaciones meteorológicas adyacentes a la zona de estudio realizada a partir de los datos del periodo de 1989-2007. Los datos fueron obtenidos del Sistema Meteorológico Nacional.

	<b>Berriozábal</b>		<b>Apic-pac</b>	
<b>Precipitación (mm)</b>	<b>Frecuencia absoluta</b>	<b>Porcentaje</b>	<b>Frecuencia absoluta</b>	<b>Porcentaje</b>
0	5598	79.57	4930	70.08
0.1-10	823	11.7	903	12.84
10.1-20	282	4.01	463	6.58
20.1-30	158	2.25	207	2.94
30.1-40	87	1.24	90	1.28
40.1-50	42	0.6	53	0.75
50.1-60	17	0.24	16	0.23
60.1-70	11	0.16	21	0.3
70.1-80	8	0.11	4	0.06
80.1-90	3	0.04	7	0.1
90.1-100	1	0.01	0	0
>100	5	0.07	0	0

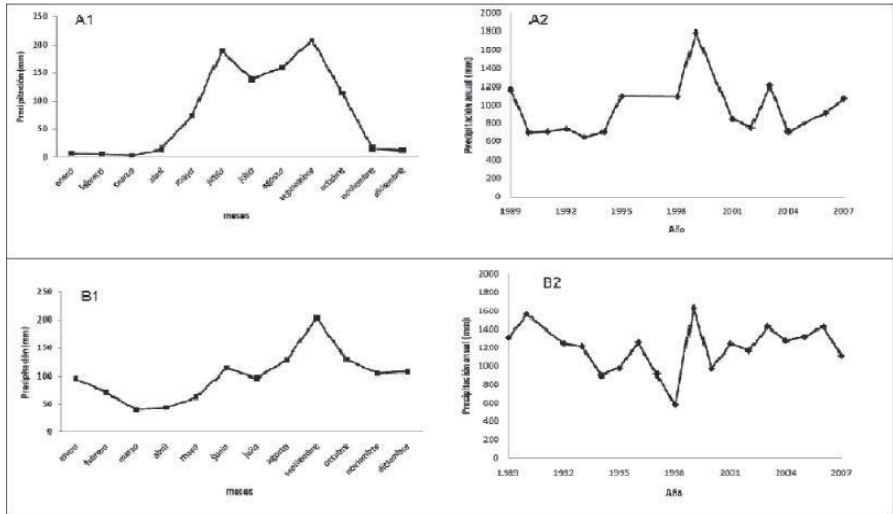


Figura 2. Régimen pluvial registrado en dos estaciones meteorológicas adyacentes a la zona de estudio. Las letras en la figura agrupan los datos obtenidos para Berriozábal (A) y Apic-pac (B). Los números en la figura representan los datos de precipitación promedio mensual (1) y el registro anual de la precipitación en la zona durante el periodo 1989-2007 (2). Los datos fueron obtenidos del Sistema Meteorológico Nacional.

La lluvia de verano en la zona de estudio es muy intensa y de corta duración, producida por la invasión de masas de aire húmedo tropical proveniente tanto del Atlántico como del Pacífico, mientras que la lluvia de otoño e invierno es menos intensa pero prolongada, debido a la incidencia de masas de aire frío que llegan del norte.<sup>[17]</sup> Generalmente las lluvias no producen una modificación significativa del río Francés y la zona de inundación en el cono de deyección no es mayor de 400 m<sup>2</sup>. Sin embargo bajo ciertas condiciones meteorológicas periódicas (producidas cada 5-15 años), el río puede alcanzar su nivel máximo y la zona de inundación ocupa 330 ha (con un perímetro de 12.5 km), capaz de producir un embalse de más de 3,000,000 de litros de agua en el cono de deyección por varios días, provocando impactos negativos en la agricultura, la ganadería y directamente a cuatro asentamientos humanos donde habitan cerca de 500 habitantes (figura 3).





Figura 3. Inundación del cono de deyección en noviembre de 2007.

La geomorfología de la microcuenca se dispone principalmente en un solo eje sinclinal compuesto por depósitos de caliza y caliza-lutita del cretácico inferior y superior (era mesozoica), respectivamente.<sup>[18]</sup> El suelo predominante es aluvial de los tipos acrisol, luvisol, litosol y rendzina,<sup>[19]</sup> suelos pobres con alto contenido de materia orgánica. El tipo de vegetación natural de la región es selva mediana, actualmente modificada casi en su totalidad por las actividades humanas a vegetación secundaria, pastizal inducido (potreros) y campos agrícolas. Particularmente los campos agrícolas pueden ser mono o policultivos, primordialmente de subsistencia, los monocultivos son principalmente de maíz y los policultivos pueden incluir café, piña y especies de valor utilitario (especies comestibles, medicinales, combustibles y ornato).<sup>[16]</sup> La microcuenca es habitada por un poco más de 8,000 habitantes distribuidos en alrededor de un centenar de localidades categorizadas con valores de alto y muy alto grado de marginación.<sup>[20] [21]</sup>

## Metodología

### Ecuación universal para estimar la pérdida de suelo (USLE)

La erosión del suelo es ocasionada por la forma particular en la cual muchas variables físicas y de manejo se combinan en un sitio determinado. La USLE es un modelo empírico que se dio a conocer en 1978,<sup>[9]</sup> representa la síntesis de varios enfoques con los que se venía abordando el estudio de la erosión de suelos desde principios del siglo pasado y actualmente, es un modelo general que sirve de referencia a múltiples adaptaciones,<sup>[22]</sup> fue diseñada para predecir la pérdida de suelo en paisajes donde se realizan prácticas agrosilvopastoriles, aunque ha sido también adaptada a zonas con vegetación natural o con bajo nivel de perturbación. La ecuación calcula una tasa de remoción de suelo causada por la precipitación pluvial y su estimación proporciona un valor medio de pérdida de suelo, en una región, (en condiciones particulares de manejo) esperado en un periodo largo de tiempo.

La USLE es un modelo empírico desarrollado para asignar un valor predictivo a partir de la obtención de un número mínimo de parámetros, en su forma esencial se resuelve con la estimación numérica de seis factores principales combinados en la siguiente expresión matemática:

$$A = R * K * LS * C * P \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

A = Pérdida de suelo promedio anual [t/ha/año]

R = Factor erosividad de las lluvias [MJ/ha\*mm/hr]

K = Factor erodabilidad del suelo [T/ha\*MJ\*ha/mm\*hr]

LS= Factor topográfico (función de longitud-inclinación-forma de la pendiente) [adimensional]

C = Factor ordenación de los cultivos (cubierta vegetal) [adimensional]

P= Factor de prácticas de conservación de la estructura del suelo [adimensional].

### Adaptación de la USLE al Sistema de Información Geográfica

El GIS, cuando es integrado a un modelo de análisis, es una herramienta muy poderosa para evaluar la erosión del suelo debido a que este evento tiene implícitas una serie de factores con una distribución espacial. La integración USLE-GIS es un método ampliamente utilizado para simular la variación espacial del proceso de erosión. En este estudio se utilizó un formato ráster para realizar la evaluación del paisaje. La estructura ráster consiste en la representación de entidades espaciales en una cuadrícula compuesta de celdas (píxel) ya que es una estructura simple y fácil de manejar que además tiene gran capacidad de superposición. El esquema de análisis utilizado se simplifica en la figura 4, que muestra el diseño aplicado para la obtención de datos para su transformación y análisis.

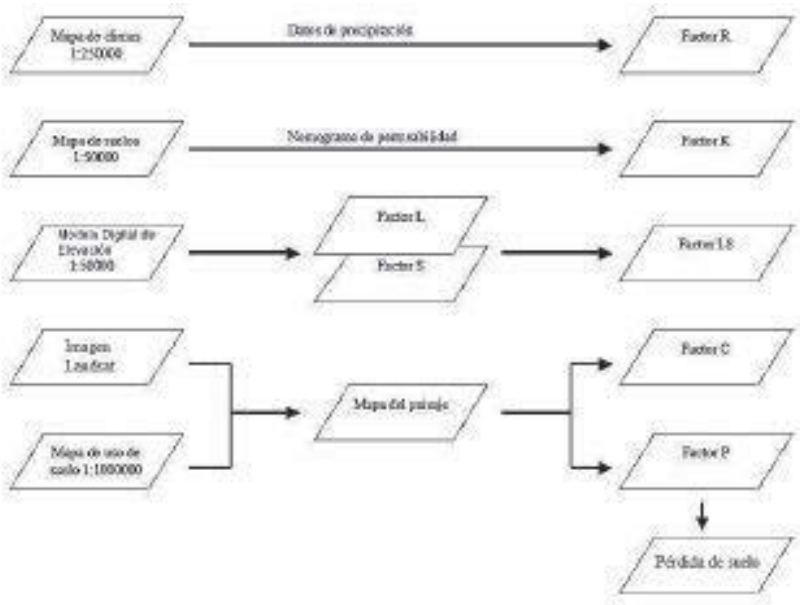


Figura 4. Esquema general del diseño de análisis utilizando la USLE y el GIS.

## Erosividad de la lluvia (Factor R)

Es el potencial erosivo de la lluvia estimado por la energía que produce la precipitación dada su intensidad y duración. Aunque la precipitación en la zona presenta una marcada variación temporal, dentro del año y entre diferentes años, en este trabajo se consideró sólo la variación espacial de la lluvia definida a partir de los climas encontrados en la zona de estudio<sup>[23]</sup> (figura 6a).

La energía cinética producida por la lluvia fue calculada aplicando un modelo binomial utilizado para evaluar la erosividad en México,<sup>[24]</sup> una ecuación empírica con la siguiente construcción:

$$R = 2.4619 + 0.006067Pa^2 \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

R = Factor erosividad de las lluvias [MJ/ha\*mm/hr]

Pa = Precipitación anual

La ecuación fue ponderada según el tipo de clima presente en la zona de estudio,<sup>[23]</sup> al cálido húmedo (Am) se le asignó una precipitación de 1400 mm, mientras que a los subhúmedos [Aw1 y Aw0 (w)] fue considerado un valor de 1100 y 800 mm respectivamente.

## Erodabilidad del suelo (Factor K)

Es la susceptibilidad del suelo a erosionarse por la actividad de la lluvia estimada como la energía necesaria para degradar una tonelada de suelo en una hectárea. El factor K representa el efecto de las propiedades del suelo así como de las características del perfil del suelo. Los valores de K fueron asignados usando el nomograma de erodabilidad del suelo, que combina el efecto del tamaño de las partículas, porcentaje de materia orgánica, el código de la estructura del suelo y la clase de permeabilidad del perfil<sup>[23]</sup> (figura 6b). Para evaluar el factor K a partir del nomograma se utilizó información generada por el ordenamiento de los tipos de suelo en la zona de estudio<sup>[19]</sup> (figura 5). Para todos los

tipos de suelo se asignó un contenido de limo y arena muy fina del 10 % sin presencia de arena (0%), si el suelo no presenta rendzina o bien, si la rendzina es el suelo de tercer orden en su composición se consideró un contenido de materia orgánica del 0%, si se presenta la rendzina en segundo orden, se asignó un valor del 2 % de materia orgánica y si es el componente principal del suelo se asignó un valor del 4 % a la materia orgánica. La estructura fue evaluada según la fase física del suelo, si el suelo presenta una fase lítica se consideró una estructura granular gruesa de otra forma fue considerada una estructura prismática. Finalmente, la permeabilidad fue categorizada según la textura, un suelo con textura fina se le asignó una permeabilidad muy lenta, mientras que al suelo con textura media se le asignó un valor de permeabilidad moderada. Con estos valores se calculan los valores del factor K con la ecuación del nomograma:

$$K = \left( \frac{1}{7.5994} \right) * \frac{[(2.1 * (10 - 4)) * (12 - MO) * M1.14 + 3.25(S - 2) + 2.5(P - 3)]}{100} \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

K = Factor de erodabilidad del suelo [t./ha.MJ\*ha/mm\*hr].

MO = Materia orgánica [%].

S = Código de la estructura del suelo.

P = Código de permeabilidad.

M = Producto de las fracciones del tamaño de las partículas primarias ó % limo + % arena muy fina)\*(100 - % arcilla).

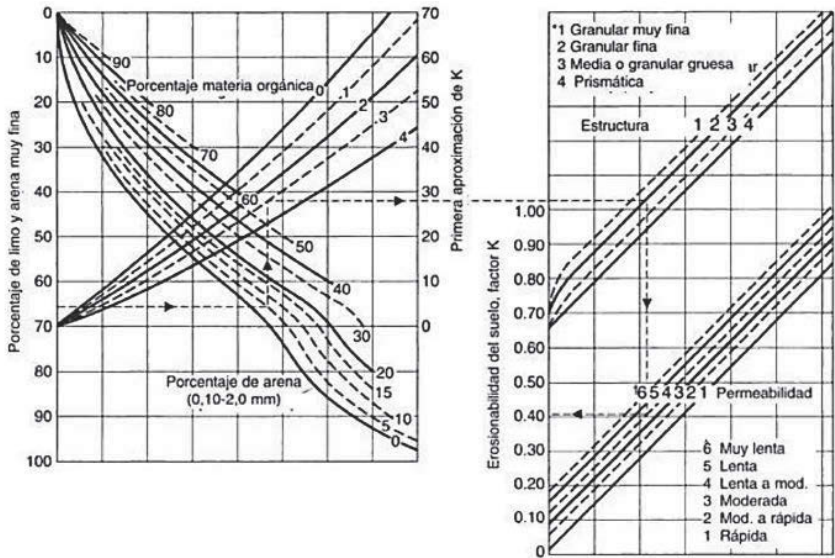


Figura 5. Nomograma de permeabilidad. En el ejemplo de su uso se ilustra la valoración del factor K para un suelo con el 74 % de limo y arena muy fina, 5% de contenido de arena, 3 % de materia orgánica, que presenta una estructura granular muy fina y una permeabilidad lenta a moderada. El valor del factor K en el ejemplo ilustrado es de 0.4 (imagen extraída de Morgan y Urbano López de Meneses 1997).

### Topografía (Factor LS)

La topografía es un factor determinante para la erosión de los suelos, el factor LS sintetiza el efecto de la pendiente con la longitud de la ladera. Para calcular la pendiente y la orientación de la ladera en la microcuenca del río Francés se utilizó un Modelo Digital de Elevación<sup>[18] [19]</sup> (figura 6c).

La longitud de pendiente se definió como la distancia horizontal desde el origen de un flujo hasta el punto donde el gradiente de la pendiente se reduce significativamente y la deposición del flujo comienza, o bien, donde el escurrimiento es concentrado en un canal definido. Para su cálculo se utilizó la fórmula propuesta por Wischmeier y Smith (1978):

$$L = \left[ \frac{I}{72.6} \right] * m \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde:

$L$  = Factor de longitud de pendiente

$l$  = Longitud de la pendiente [pies]

$m$  = Exponente de la longitud de la pendiente

El exponente de longitud de pendiente  $m$  que determina la relación entre erosión causada por flujo de agua en el terreno y la erosión causada por impacto de gotas de lluvia en el terreno, puede ser calculado con la siguiente ecuación:

$$m = (0.1342 * LN(q) + 0.192) \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde:

$m$  = Exponente de la longitud de la pendiente

$q$  = Angulo de pendiente [%]

Para calcular el efecto de la inclinación de la pendiente en la erosión del suelo se utilizó la siguiente ecuación para pendientes que tuvieran una longitud mayor a cinco metros:

$$S = 10.8 * (\text{sen } q - 0.03) \quad (\text{Ec. 6})$$

Cuando  $S < 9\%$

$$S = 16.8 * (\text{sen } q - 0.5) \quad (\text{Ec. 7})$$

Cuando  $S > 9\%$

Donde:

$S$  = Factor de inclinación de pendiente

$S$  = Inclinación de pendiente [%]

$q$  = Angulo de pendiente [°]

En este estudio, se calculó el valor del factor LS como el valor promedio para cada casilla del raster y las ocho casillas de su vecindario.

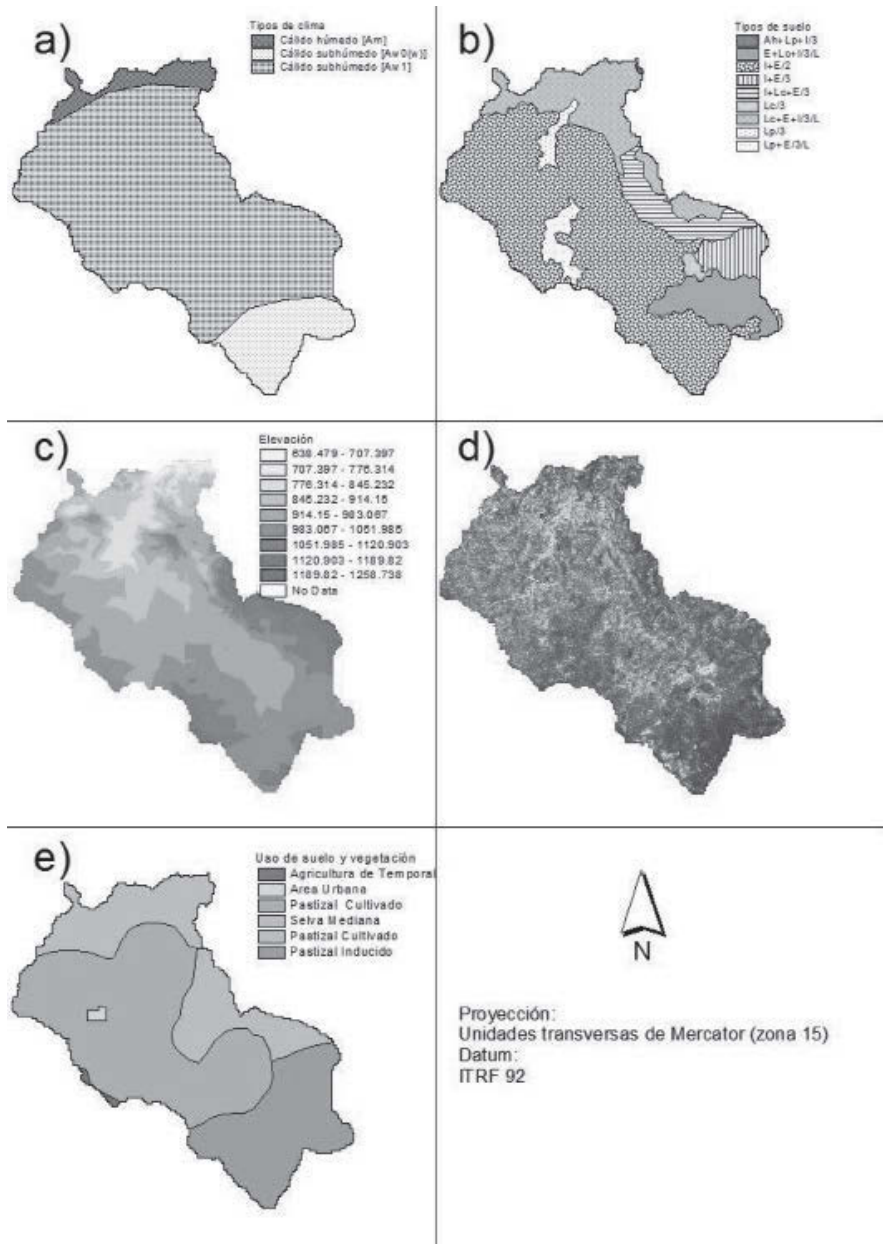


Figura 6. Tipos de clima (a), tipos de suelos (b), topografía (c), cobertura forestal (d) y uso de suelo (e) encontrados en la zona de estudio.



### Cobertura vegetal (Factor C)

El factor C es la estimación de la protección del suelo debido a la vegetación. La cantidad y velocidad con la que el agua remueve el suelo depende de la vegetación que lo cubre. Los suelos de paisajes con vegetación permanente son muy estables pero tan pronto como la vegetación es removida, la erosión se acelera significativamente. Existen diferentes formas de estimar la cobertura vegetal en un paisaje, en este estudio se utilizó una reclasificación simple de una imagen de satélite tipo Landsat (6 d). Los valores asignados oscilaron entre 0.1 hasta 1, donde los sitios sin vegetación tienen valor de 1 mientras que los sitios con vegetación densa (según el análisis espectral considerado) tomaron valores de 0.1.

### Prácticas de manejo (Factor P)

El factor P es la estimación del impacto de las prácticas de uso de suelo sobre la erosión del paisaje. Las actividades humanas pueden acelerar en gran medida las tasas de erosión; las actividades agrícolas convencionales han aumentado la erosión de forma considerable debido a que generalmente se quema el rastrojo dejando el suelo desnudo y con mayor susceptibilidad a la erosión. En este estudio, se asignaron valores arbitrarios de acuerdo a la descripción del uso de suelo en la microcuenca<sup>[26]</sup> (figura 6e), a las zonas urbanas se les asignó un valor de 0, a las zonas conservadas un valor de 0.1, mientras que las zonas de manejo, tanto agrícola como de pastoreo se les asignó un valor de 0.5.

### Adaptación del binomio USLE-GIS a un modelo de riesgo

En este estudio la evaluación de la USLE no fue utilizada en su forma convencional al obtener un valor predictivo de la tasa de suelo erosionado en un intervalo de tiempo (ec. 1), sino que se asumen los supuestos implícitos en el modelo matemático para asignar un valor relativo de riesgo a la erosión hídrica. Es decir que la extensión espacial de la USLE con el GIS permitió delimitar superficies con diferente nivel de exposición de riesgo que no pueden ser traducidas directamente a un

valor de pérdida de suelo, sino simplemente, a un valor de riesgo a la erosión relativo a los atributos de la microcuenca del río Francés. La evaluación de riesgo es el cálculo del producto de dos eventos probabilísticos independientes entre sí, el peligro y la vulnerabilidad. El peligro es el impacto que puede ocasionar un fenómeno natural en el ambiente, mientras que la vulnerabilidad está determinada por la susceptibilidad de un sistema a ser alterado por un fenómeno natural en particular.

En el presente trabajo se identifican superficies con diferentes niveles de peligro determinadas por el valor del factor R (ec. 2), el sentido de utilizar los valores de este parámetro es para considerar una relación geométrica entre la intensidad de la lluvia y el impacto que podría ocasionarle al suelo. Los valores de probabilidad se asignaron con un patrón espacial uniforme en una matriz compuesta por celdas de 50x50 m. El valor de cada celda fue asignado con base en la siguiente expresión:

$$P_i = \left( \frac{R_i}{\sum NR} \right) \quad (\text{Ec. 8})$$

Donde

$P_i$ =Peligro de erosión en el pixel  $i$ ésimo relativo al impacto esperado de la lluvia según su ubicación en la microcuenca.

$R_i$ =Valor del factor R calculado para el pixel  $i$ ésimo.

$NR$ =Niveles del factor R.

En este estudio se delimitaron superficies con diferentes niveles de vulnerabilidad determinadas por los factores K, LS, C y P. Para realizar el cálculo de la vulnerabilidad no se consideró la naturaleza de los datos de origen, tanto el factor K como el LS son variables numéricas, con distribución geométrica y polinomial respectivamente, mientras que el factor C y P son variables categóricas designadas arbitrariamente al paisaje, simplemente se asume un evento que resume un sistema complejo de elementos físicos y biológicos. Los valores de probabilidad se asignaron en una matriz compuesta por celdas de 50x50 m. El valor de cada celda fue asignado con base en la siguiente expresión:

$$Vi = \left( \frac{Ki * LSi * Ci * Pi}{\max(K * LS * C * P)} \right) \quad (\text{Ec. 9})$$

Donde

$V_i$ =Vulnerabilidad de erosión del pixel  $i$ ésimo relativo a la susceptibilidad esperada por los atributos edáficos, topográficos y de manejo que presenta.

$K_i$ =Valor del factor K calculado para el pixel  $i$ ésimo.

$LS_i$ =Valor del factor LS calculado para el pixel  $i$ ésimo.

$C_i$ =Valor del factor C calculado para el pixel  $i$ ésimo.

$P_i$ =Valor del factor P calculado para el pixel  $i$ ésimo.

$\max(K_i * LSi * C_i * P_i)$ =Valor máximo obtenido en el paisaje del producto de los factores K, LS, C y P.

De tal forma que para obtener el valor de riesgo se reescribió la ecuación 1 en la siguiente expresión numérica:

$$Ri = Pi * Vi \quad (\text{Ec. 10})$$

Donde

$R_i$ =Riesgo de erosión del pixel  $i$ ésimo en función del peligro y vulnerabilidad.

## Resultados y discusión

El riesgo de erosión de suelo fue modelado en la microcuenca del río Francés, utilizando como guía base la ecuación universal para estimar la pérdida de suelo (USLE). La utilidad de la USLE como modelo predictivo de la tasa de suelo erosionado ha sido aprobada por varios estudios, pero también, se ha señalado que puede llegar a ser una herramienta con una alta imprecisión para escalas temporales y espaciales pequeñas.<sup>[8]</sup> En este trabajo no se presentan los valores de los parámetros R, K, LS, C y P en el sentido predictivo que primordialmente tienen. Lo anterior porque consideramos que existen algunas indeterminaciones importantes de los datos de entrada e incluso, que hacen falta algunos ajustes operativos para recuperar el beneficio original del modelo. Sin embargo, la extensión de la USLE a través del GIS nos parece un ejercicio exploratorio relevante

que permite realizar el planteamiento de algunas hipótesis del comportamiento de la remoción de suelo en la zona de estudio.

Los valores del Factor R obtenidos en la microcuenca del río Francés utilizando isoyetas de 800, 1100 y 1400 mm de precipitación anual fueron de 5852, 10049 y 15338 MJ/ha\*mm/hr respectivamente (figura 7a), el Factor R tuvo una moda de 10049 MJ/ha\*mm/hr debido a la dominancia del clima cálido subhúmedo del tipo Aw1 (figura 6a). La estimación de la erosividad del suelo a partir de valores medios esperados de energía liberada por la magnitud e intensidad de la lluvia en periodos anuales es una fuente de imprecisión en la USLE cuando existe una marcada variación temporal o espacial.<sup>[27]</sup> En la zona de estudio no sólo existe una variación estacional sino también una variabilidad de años secos con tres veces menos lluvia que en los años más húmedos (figura 2). Debido a los atributos climáticos de la zona de estudio será necesario ajustar la parametrización del Factor R para obtener datos más robustos en la USLE.

El Factor K tomo valores en el paisaje que oscilaron entre el 0.4 y 0.9 t/ha\*MJ\*ha/mm\*hr (figura 7b). Debido a que el suelo de la microcuenca es aluvial donde domina el tipo litosol con rendzina de textura media (figura 6b), el valor medio del Factor K en el paisaje fue de 0.7 t/ha\*MJ\*ha/mm\*hr. Los valores de erodabilidad alcanzaron valores más altos de los esperados, posiblemente por la caracterización de los datos de entrada que exigen una mayor apreciación de las condiciones físicas y químicas del suelo para la correcta interpretación del nomograma de permeabilidad, sin embargo es pertinente señalar que algunas aproximaciones de campo parecen apuntar a tener una condición relativamente homogénea del suelo en el paisaje de estudio.

Los resultados encontrados en nuestro trabajo muestran que el factor LS tomó valores que oscilan entre el 0.02 y 11.9 (figura 7c). La mayoría de la pendiente del paisaje es menor a los 9°, aunque existen pendientes que alcanzan los 45° no son laderas demasiado pronunciadas, la mayoría de las laderas de la zona son menores a los 1000 m de longitud. El valor promedio del Factor LS en el paisaje fue de 0.87. A diferencia de los Factores R y K que caracterizan el impacto de las gotas de lluvia a las partículas del suelo, el Factor LS busca sintetizar el escurrimiento laminar y el movimiento en hondonadas.

Los modelos de escorrentía son una herramienta útil para predecir y simular los caudales de una cuenca con base en una conceptualización simplificada de varios procesos físicos, como la infiltración, evaporación, flujo superficial y flujo subterráneo.<sup>[28]</sup> El cálculo del Factor LS es en sí mismo un modelo de escorrentía que caracteriza la dirección y acumulación del flujo del agua superficial y explica las avenidas fluviales así como el incremento del caudal del río Francés en los eventos de inundación del cono de deyección que suceden de forma extraordinaria pero periódicamente (figura 3).

Los métodos de teledetección han sido utilizados ampliamente para generar mapas de cobertura vegetal.<sup>[29]</sup> Respecto a la estimación de los valores del Factor C en el paisaje de estudio, se encontraron valores que oscilan entre los 0.05 y 1 (figura 7d). En este estudio se utilizó un sistema de reclasificación simple que sobrevalora la cantidad de cobertura arbórea en la zona de estudio debido a que un error común en la reclasificación simple es que suceden confusiones entre categorías parecidas.

La vegetación arbórea determina de forma importante una baja erosión del suelo. En un bosque denso, las raíces y la tierra forman una red que permite el paso del agua sin descomponer la estructura del suelo. Las plantas y los animales que viven en el subsuelo remueven la tierra y la mantienen porosa, de modo que el agua se infiltra en vez de correr por la superficie provocando erosión.<sup>[30]</sup> En la zona de estudio existen fragmentos naturales remanentes de selva mediana, aunque la mayoría son fragmentos arbóreos pequeños de vegetación secundaria. Algunos estudios muestran que la vegetación secundaria puede actuar en el mismo sentido que el bosque maduro como medio protector a la erosión.<sup>[31]</sup>

La clasificación del paisaje para el Factor P osciló entre 0 y 1 (figura 7e). Al área urbana de la comunidad de Ocuilapa de Juárez le asignamos el valor de 0 y el valor máximo de 0.5 fue asignado a la mayoría del paisaje por estar compuesto de potreros y zonas de cultivo. Es común que los Factores C y P se agrupan bajo un solo parámetro porque actividades como la construcción de caminos o edificios, así como algunas prácticas de cultivo, ganadería y de aprovechamiento forestal remueven la cobertura vegetal y modifican la estructura del suelo, lo que incrementa la pérdida de suelo.<sup>[9]</sup> En este estudio, el análisis fue realizado para determinar categorías de riesgo a la erosión del suelo relativas al

paisaje y de esta forma detectar áreas críticas dentro de la unidad de estudio. No obstante, en ausencia de datos que permitan la validación de los resultados obtenidos, la USLE no deberá ser considerada una estimación predictiva de la cantidad de suelo que se pierde en el paisaje.

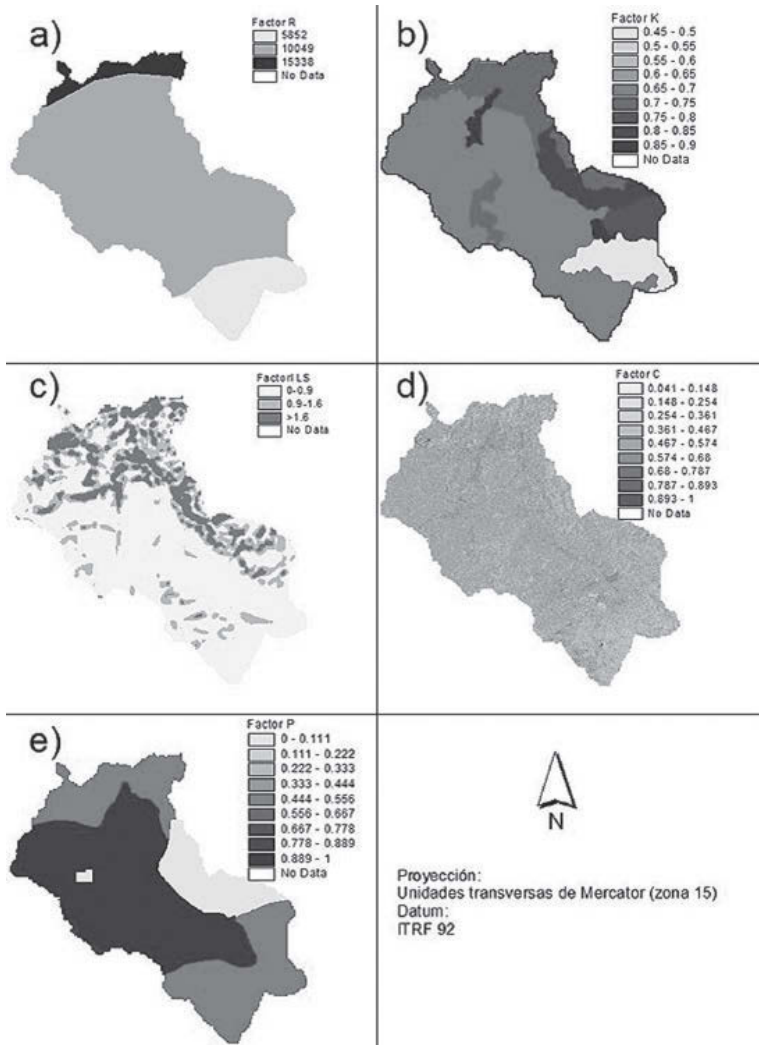


Figura 7. Distribución espacial en el paisaje de estudio del Factor R (a), Factor K (b), Factor LS (c), Factor C (d) y Factor P (e).

Debido a que en esencia se realizó el mismo cálculo para obtener “valores de probabilidad” que determinan el riesgo a la erosión en la microcuenca del río Francés no se presentan los valores absolutos de la evaluación de peligro y vulnerabilidad porque carecen de una escala de referencia, no obstante, sostenemos que esta aproximación permite delimitar un patrón de erosión potencial que resulta de la combinación sistemática de factores climáticos, edáficos, topográficos y biológicos.

Nuestros resultados asumen que el peligro tiene una distribución espacial uniforme mientras que la vulnerabilidad presenta una autocorrelación espacial (figura 8). Definitivamente los patrones observados corresponden a la naturaleza de los datos de origen pero no dejan de tener cierto sentido, la precipitación puede tener un comportamiento temporal impredecible, pero en el espacio pueden delimitarse superficies relativamente homogéneas de lluvia (cortinas). Mientras que la vulnerabilidad está determinada por factores asociados espacialmente entre sí (suelo, topografía y componentes biológicos).

Con base en el ejercicio realizado en este trabajo el 13 % de la microcuenca se encuentra en un nivel bajo de peligro, el 82 % de la zona tiene nivel medio y el restante 5 % un nivel alto (figura 8a). Mientras que en términos de la vulnerabilidad, el 75 % de la zona tiene un nivel bajo, 23 % un nivel medio y el 2 % restante un nivel alto de vulnerabilidad (figura 8b). En estudios realizados en algunas zonas tropicales se ha encontrado que el Factor R es el determinante en el riesgo a la erosión.<sup>[32]</sup>

Los resultados encontrados indican que alrededor del 1 % del paisaje se encuentra en un alto grado de riesgo, 8 % presenta un nivel medio y el 91 % restante tiene un nivel bajo a la erosión (figura 9). La distribución de las zonas de mediano y alto riesgo se encuentra en las laderas que rodean el cono de deyección, ubicadas en la parte norte de la zona de estudio donde se encuentra la parte más baja de la microcuenca.

La reforestación puede considerarse como una estrategia de corrección hidrológica que puede aplicarse en las laderas con mayor riesgo a la erosión. El incremento de la cubierta vegetal permite mayor infiltración y tiempo de concentración del agua, la corrección hidrológica puede llevarse a cabo considerando distancias de siembra y el cultivo de especies que estimulen el sotobosque para lograr un sistema eficiente en la intercepción de agua.

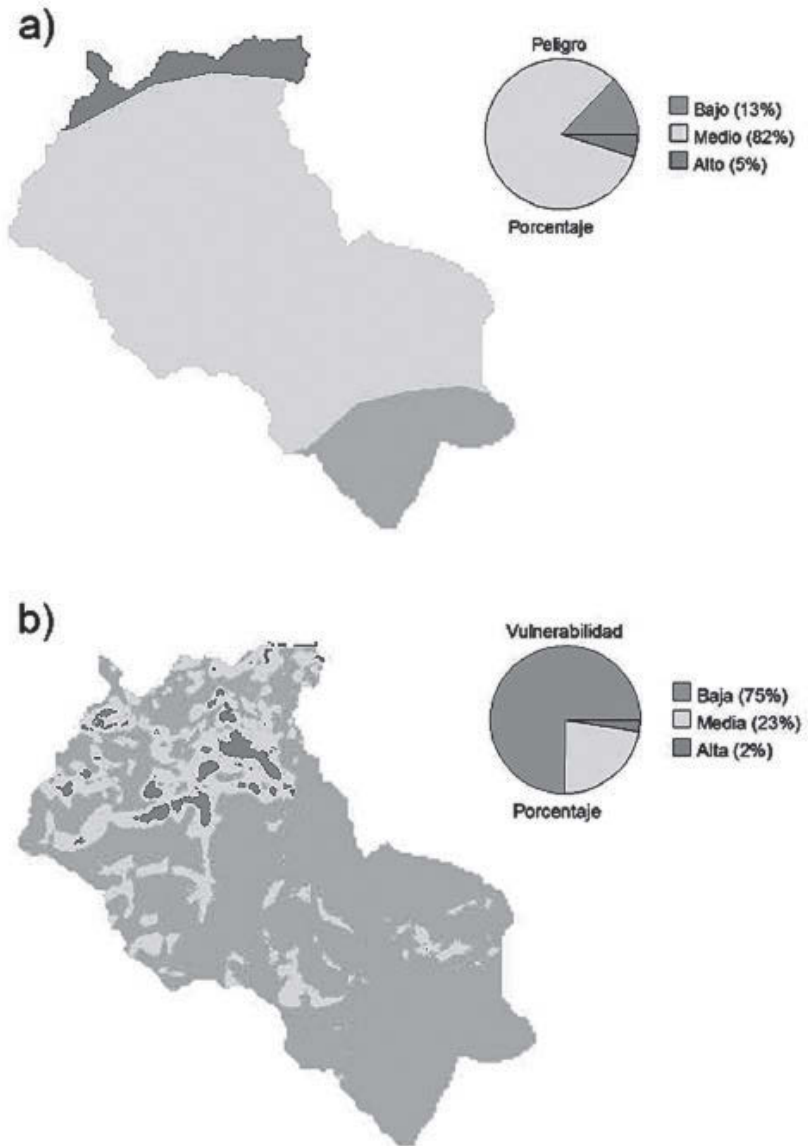


Figura 8. Distribución espacial del peligro (a) y vulnerabilidad (b) en el paisaje de estudio.



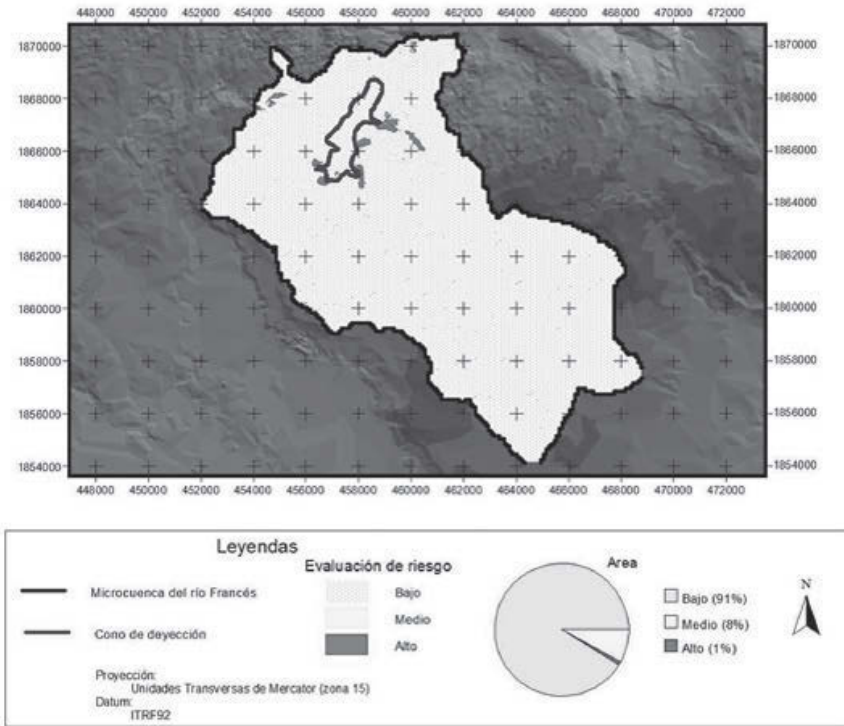


Figura 9. Mapa de riesgo a la erosión del suelo en la microcuenca del río Francés.

Particularmente en la zona de estudio se sugiere la reforestación de subsistencia, es decir el diseño y aplicación de sistemas forestales desarrollados para permitir la regeneración de la cobertura vegetal, la disminución de la erosión y que además permita satisfacer la demanda de leña de la comunidad. Algunas especies de rápido crecimiento como el quebracho (*Acacia spp*) y el humo (*Nectandra spp*), especies preferidas como leña en la zona de estudio, podrían propagarse intencionalmente como estrategia para disminuir la pérdida de suelo así como para obtener combustible.

Como medidas complementarias a la reforestación se podría considerar la utilización del rastrojo remanente de las siembras para conservar los suelos así como la construcción de diques, espigones, zanjas

o presas para contener o dirigir el desplazamiento laminar del suelo en las laderas de mayor riesgo a la erosión. Así como también, realizar capacitación técnica a los campesinos de la comunidad para modificar las prácticas de labriego hacia acciones de manejo que consideren la conservación de los suelos.

## Consideraciones finales

Los métodos de evaluación de la erosión constituyen una parte importante en el diagnóstico de los recursos naturales y la tendencia es a una mayor influencia de la matematización y el uso de nuevas tecnologías informáticas. La aplicación del binomio USLE-GIS en la zona de estudio permitió obtener información útil para el entendimiento de la dinámica del suelo, que además puede ser empleada para proponer estrategias de manejo y conservación. En este estudio se utilizó una herramienta sencilla que puede ser de relativa fácil interpretación, aunque no fue empleada para cuantificar la pérdida de suelo, la clasificación de riesgo puede ayudar a identificar áreas críticas, así como alternativas para el control de la erosión en la zona de estudio.

## Bibliografía

- [1] Oyarzun-Ortega, C., 1993, *Evaluación del modelo U.S.L.E. para predecir pérdidas de suelo en áreas forestadas de la cuenca del río Bío-Bío*. Bosque 14: 45-54.
- [2] Lal, R, 1998, "Soil erosion impact on agronomic productivity and environment quality" en *Critical Reviews in Plant Sciences* 17 pag. 319-464.
- [3] FAO, 1994, *Land degradation in South Asia: its severity, causes and effects upon the people*. UNEP.
- [4] Lal, R, 2001, "Soil degradation by erosion" en *Land degradation & development* 12 pag. 519-539.
- [5] Bautista F, y Palacio, G., 2005, *Caracterización y manejo de los suelos de la Península de Yucatán: Implicaciones agropecuarias, forestales y ambientales*. Instituto Nacional de Ecología, Universidad Autónoma de Yucatán y Universidad Autónoma de Campeche.
- [6] Blanco, H., y Lal, R., 2008. *Principles of soil conservation and Management*. Springer.
- [7] Walling, D., y Webb, B., 1983, "Patterns of sediment yield" en K. Gregory (ed.). *Background to palaeohydrology*, Wiley.

- [8] Morgan, P, C, C, Urbano López de Meneses, J., de M., 1997, *Erosión y conservación de suelos*. Mundiprensa. Disponible en línea: <http://books.google.es/books?id=jcFqaFI-ulUC&printsec=frontcover> (consultado en julio del 2009).
- [9] Wischmeier, W, y Smith, D, 1978, "Predicting rainfall erosion losses, a guide to conservación planning" en *agricultura handbook*, No. 537. US Department of Agriculture.
- [10] Shao, Y., 2001, *Physics and Modelling of Wind Erosion*. Academic Publisher.
- [11] Yu, B., 2003, "A unified Framework for water erosion and deposición equations", *Soil Science Society American Journal* 67:251-257.
- [12] Mihara, M, Yamamoto, N, y Ueno, T, 2005, Application of USLE for the prediction of nutriente losses in soil erosion processes. *Paddy Water Environmental* 3:111-119.
- [13] Gournellos, T., Evelpidou, N., y A., Vassilopoulos, 2004, "Developing an erosion risk map using soft computing methods (case study at Sifnos islán)" en *Natural Hazards* 31 pag. 63-83.
- [14] Fistikoglu, O., y Harmancioglu, N., B., 2003, "Integration of GIS with USLE in assessment of soil erosion" en *Water Resources Management* 16: 447-467.
- [15] Morgan, P., C., Quinton, J., N., y Rickson, R., J., 1994, Modelling methodology for soil erosion assessment and soil conservation design: the EUROSEM approach, *Outlook in Agriculture* 23 pag. 5-9.
- [16] Escobar M, C, 2003, *Diagnóstico participativo sobre el uso, demanda y abastecimiento de leña en el ejido Ocuilapa de Juárez, Ocozocuautila de Espinosa, Chiapas*. El Colegio de la Frontera Sur.

- [17] Toledo, A., 2003, *Ríos, costas y mares: hacia un análisis integrado de las regiones hidrológicas de México*. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología y El Colegio de Michoacán.
- [18] INEGI, 2002, *Carta edafológica digital 1:250000 E151I*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- [19] INEGI, 2002, *Carta geomorfológica digital 1:250000 E151I*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- [20] INEGI, 2005, *II Censo de población y vivienda*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- [21] CONAPO, 2005, *Índices de marginación*. Consejo Nacional de Población.
- [22] Patriche, C., Captana V., y Stoica D., L., 2006, Aspects regarding soil erosion spatial modeling using the USLE/RUSLE within GIS. *Geographia Technica* 2 pag. 88-97.
- [23] INEGI, 1990, *Carta climática digital 1:1000000*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- [24] SEMARNAT, 2005, *Informe de la situación del medio ambiente en México*. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Disponible en línea: [http://appl.semarnat.gob.mx/dgeia/informe\\_04](http://appl.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_04) (consultado en julio del 2009).
- [25] Renschler C., S., Mannaerts C., y Diekkrüger B., 1999, "Evaluating spatial and temporal variability in soil erosion risk—rainfall erosivity and soil loss ratios in Andalusia, Spain" en *Catena: an interdisciplinary journal of soil science, hydrology, geomorphology focusing on geocology and landscape evolution*, 34 pag. 209-225.

- [26] INEGI, 1990, *Carta de vegetación y uso de suelo digital 1:1000000*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- [27] Petkovsek, G., y Matjaz M., 2004, "Estimating the R factor from daily rainfall data in the sub-Mediterranean climate of southwest Slovenia" en *Hydrological Sciences–Journal–des Sciences Hydrologiques*, 49 pag. 869-877.
- [28] Perrin, C., Michel, C., y Andreassian, V., 2003, Improvement of a parsimonious model for streamflow simulaci3n. *Journal of Hydrology* 27 pag. 275-289.
- [29] Homer, C., Ramsey, D., Edwards, T., y Falconer, A., 1997, Landscape Cover-Type Modeling Using a Multi-Scene Thematic Mapper Mosaic. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 63: 59-67.
- [30] Dewberry, S., y Davis, L., 2008, *Land development handbook*. McGraw-Hill.
- [31] Garcia-Fayos, P., 2004, "Interacciones entre la vegetaci3n y la erosi3n h3drica" en: Valladares, F (ed.). *Ecolog3a del bosque mediterr3neo en un mundo cambiante*. Ministerio de Medio Ambiente, EGRAF.
- [32] Erdogan E, Erpul, I, y Bayramin I, 2007, Use of USLE/GIS Methodology for Predicting Soil Loss in a Semiarid Agricultural Watershed. *Environmental Monitoring and Assessment* 131:153–161