

¿Cuánto nos cuesta la erosión de suelos? Aproximación a una valoración económica de la pérdida de suelos agrícolas en México

Helena Cotler¹, Carlos Andrés López², Sergio Martínez-Trinidad³

“Soil is our most underappreciated, least valued,
and yet essential natural resource”

Montgomery, 2007

Resumen

La erosión del suelo representa un peligro ambiental crítico para México, por la amenaza a la sostenibilidad de la producción agrícola y por las múltiples externalidades locales y regionales. Con el fin de determinar su magnitud se evaluó el costo de la erosión del suelo en términos de pérdida de productividad y por pérdida de nutrientes. El análisis de 140 publicaciones mostró que la investigación se ha centrado a nivel de parcela, donde se concentra el 45% de los estudios. En ellas, el costo de la pérdida de suelo ocasionado por la erosión se ubica en el rango de US \$ 16.2 a US \$32.4/ha mientras que el costo de reemplazo de los nutrientes perdidos asciende a US\$22.1/ha. En relación con la superficie total de maíz blanco de temporal a nivel nacional, este costo sería de 4.2 a 7.2% del valor de producción, lo cual representa del 48 al 51% del monto entregado por PROCAMPO. Este análisis no enfatiza el valor del servicio ambiental del suelo, sino que da una idea de su valor *in situ*. Estas cifras subrayan la gravedad de la erosión del suelo en México como un obstáculo para la sostenibilidad financiera de las familias rurales. A pesar de varios programas de conservación que se han desarrollado durante las últimas décadas, la eficiencia de su implementación es mínima debido a que a pesar de su relevancia, la erosión del suelo aún no se ha integrado en la agenda política.

Palabras claves

Erosión, suelos agrícolas, valoración económica, México.

Abstract

The erosion of agricultural soil represents an environmental hazard in Mexico that threatens the sustainability of agricultural production and causes multiple externalities at the local and regional scales. This study evaluates the on-site economic costs of soil erosion in non-irrigated white corn agriculture by estimating the value of productivity loss and the replacement costs for lost nutrients. Our results are based on a revision of 140 previous studies of soil erosion in Mexico, of which 45% were performed at the plot level. We found that the on-site economic costs of soil erosion are in the range of US \$16/ha/yr and US \$32/ha/yr when estimated by productivity loss, and equal US \$22/ha/yr, when estimated by the replacement costs of lost nutrients. We found that erosion costs can represent between 48% and 51% of the amount per hectare given by PROCAMPO each year and, if aggregated, between 4% and 7% of the national value of non-irrigated white corn output. While not constituting a comprehensive evaluation of the environmental services of agricultural soils lost to erosion, the on-site costs of soil erosion already challenge the financial sustainability of Mexican peasant households. Given the magnitude of the problem, we suggest that the programs of soil conservation under implementation are not adequate, and that soil erosion should occupy a more central place in the design of public policies.

Keywords

Erosion, agricultural soil, economical value, México.

¹ Instituto Nacional de Ecología, hcotler@ine.gob.mx.

² Instituto Nacional de Ecología, clopez@ine.gob.mx.

³ Posgrado de Ciencias de la Tierra- UNAM, sergiomtz@hotmail.com.

INTRODUCCIÓN

La agricultura constituye la principal actividad sobre la cual se han construido las civilizaciones, actividad que está estrechamente ligada a la fertilidad de los suelos (Montgomery 2007). Por ello, la degradación del suelo está considerada como el mayor problema ambiental que amenaza la producción mundial de alimentos (PNUMA 2000) y uno de los principales peligros para el desarrollo sostenible de los terrenos agrícolas (Castillo 2004).

La erosión hídrica de los suelos ocasiona impactos tanto en la parcela (*in situ*), como fuera de ella (*off situ*) que han sido ampliamente documentados, a través de temas como la disminución de la productividad de los suelos degradados (Pimentel et al. 1993; Stocking 2003; Tengberg et al. 1998) la pérdida de suelo y nutrientes (Martínez-Casasnovas y Ramos 2006; Maass et al. 1988) y por las consecuencias ambientales ocasionadas por la pérdida de servicios ecosistémicos brindados por los suelos (Barrios 2007; Hodson y Dixon 1988).

Los ejercicios tendientes a valorar los ecosistemas y los servicios ambientales aún son incipientes, puntuales y muchas veces insuficientes e incompletos. La perspectiva de valorar económicamente los servicios que otorgan los ecosistemas puede convertirse en una tarea titánica, y nunca completa. Por ello, generalmente la valoración de un ecosistema o un componente de éste suele expresarse considerando uno o algunos de sus beneficios. Bajo esta premisa, en México se ha avanzado en la expresión económica de los manglares asociándolos al valor de las pesquerías (Ezcurra et al. 2009); el valor recreativo de los parques, el daño a ecosistemas por obras o la valoración para fijar compensaciones (Sanjurjo e Islas 2007). Sin duda, la valoración económica de servicios ambientales se ha convertido hoy en día en una herramienta poderosa para guiar la toma de decisiones.

Las metodologías económicas convencionales para evaluar los costos asociados a la pérdida de suelos por actividad agrícola presentan una amplia complejidad en su implementación, debido principalmente a tres elementos clave. El primero es la temporalidad: la tasa de erosión del suelo agrícola es un fenómeno temporal, que afecta negativamente las condiciones futuras de producción. El segundo elemento es espacial: los impactos de la erosión se manifiestan tanto *in situ* como *off situ*, y pueden ser difícilmente observables. El tercero es institucional: aún suponiendo que es posible identificar y evaluar económicamente los costos de la erosión y de las medidas de

conservación, la ausencia de esquemas institucionales que establezcan incentivos adecuados para balancear los puede generar que la tasa de erosión óptima privada sea superior a la tasa óptima social. Esto puede ocurrir, por ejemplo, cuando los productores agrícolas toman en cuenta el total de los impactos *in situ* pero ignoran los impactos *off situ*. La investigación empírica existente en la literatura difícilmente abarca la complejidad del fenómeno, y más bien los estudios se dividen de dependiendo si estiman los costos *in situ* u *off situ* con datos observables. Para este artículo interesan los métodos y aplicaciones para la estimación de los primeros.

Uno de los mecanismos utilizados para llamar la atención sobre la importancia de los servicios ambientales proporcionados por los suelos ha sido evaluar los costos generados por su erosión (Barbier 1996; Cohen et al. 2006; Martínez-Casasnovas y Ramos 2006; Pimentel et al. 1995). En este contexto, la fertilidad de los suelos y su pérdida también han sido sujetas a valoraciones económicas, a través del impacto de la erosión en la productividad; pero aún este valor sigue estando subrepresentado en los datos de investigación disponibles (Stroosnijder 2005).

1.1 Investigación sobre erosión de suelos en México

La diversidad de los efectos, directos e indirectos, de la degradación de suelos (Cotler et al. 2007) la convierte en uno de los mayores problemas ambientales y sociales de México (Maass y García-Oliva 1990).

En México, la agricultura constituye el sustento directo de 5.8 millones de personas e indirectamente a cerca de 25% de la población, sobre todo en las zonas rurales (CONAPO 2008). Sin embargo, la producción agrícola no logra mejorar las condiciones rurales, donde la pobreza sigue siendo un tema crítico (Vélez et al. 2007), a menudo exacerbada por el aumento del costo de manejo del cultivo, ya que los agricultores requieren mayores cantidades de fertilizantes minerales para mantener la fertilidad del suelo (Scherr y Yadav 1996).

Las consecuencias de la degradación de suelos sobre las actividades agropecuarias son notorias en México. Según el VIII Censo Agropecuario (INEGI 2007) durante el ciclo primavera-verano 2007 más de un cuarto de las unidades de producción con superficie agrícola del país (31%) no fueron sembradas, aduciendo que el suelo estaba erosionado, con baja fertilidad o bien que se dejó descansar. Siendo esto último una estrategia de

los agricultores para permitir al suelo recuperar parte de su fertilidad, luego de su deterioro. Esto significa que en 300,890 unidades de producción no se obtuvo ninguna cosecha durante esa temporada, impactando la seguridad alimentaria de México.

La erosión de suelos es uno de los riesgos ambientales más importantes en México. A pesar de haber sido estudiado durante varias décadas, el conocimiento actual de este proceso es aún bastante escaso y superficial.

La investigación relacionada con la erosión de suelos en México data ya de varias décadas (Cotler 2010). A lo largo de ellas se han utilizado diferentes metodologías, plazos y escalas de estudio que concluyen que entre el 40% y el 98% del territorio mexicano presenta degradación de suelos (Estrada y Ortiz 1982; García 1983). Algunos incluso postulan que la pérdida de suelo se ha subestimado durante las últimas cuatro décadas (Maass y García-Oliva 1990). El informe más reciente (SEMARNAT-Colegio de Posgraduados 2002) reconoce que el 45% del territorio nacional (888,968.75 km²) muestra un cierto grado de degradación de suelo, principalmente a través de la erosión hídrica y del agotamiento de nutrientes, donde las actividades agrícolas ocasionan el 77% de deterioro. En las últimas décadas se ha utilizado una amplia variedad de metodologías para estudiar la erosión hídrica del suelo -que van desde imágenes de satélite a modelos matemáticos-, aunque resalta la notable escasez de estudios sustentados en datos experimentales *in situ*. Esta situación da como resultado una ausencia de metodologías homogéneas y comparativas (Maass y García-Oliva 1990). Por otro lado, muy pocos estudios

están concebidos como un análisis de erosión del suelo a largo plazo, lo cual limita la información proporcionada sobre el rendimiento en el tiempo y bajo diferentes sistemas de producción.

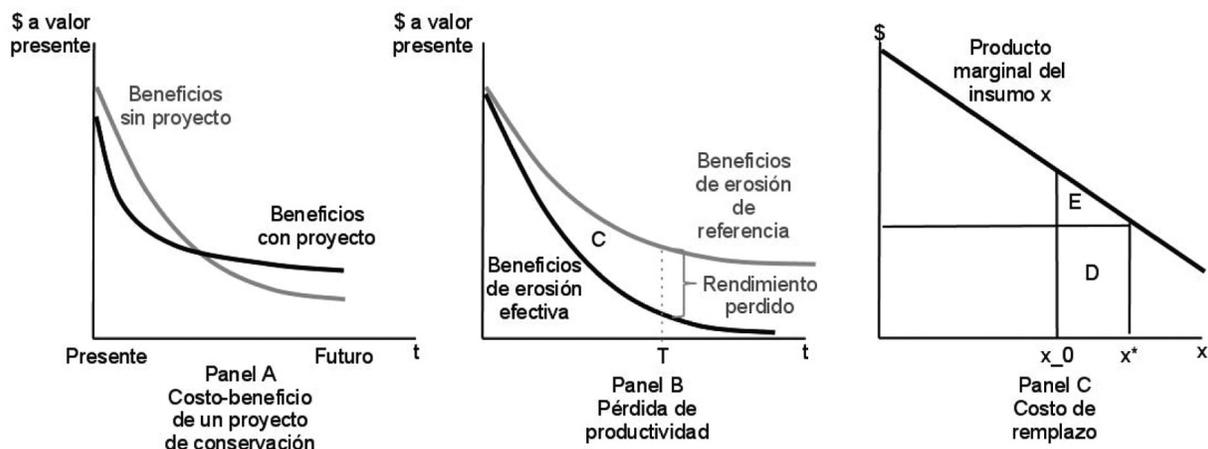
La investigación se ha centrado principalmente en la disminución del rendimiento causado por la erosión, donde la mayoría de los estudios giran en torno a tres escalas: la parcela, el nivel estatal y el nacional.

1.2 Métodos de valoración económica de suelos *in situ*

En la literatura se mencionan tres métodos de aproximación a la valoración económica de la erosión de suelos: el análisis costo-beneficio de realizar proyectos de conservación, la evaluación monetaria de la pérdida de productividad y la estimación de los costos de reemplazo.

El primer método consiste en realizar comparaciones de las ventajas y desventajas económicas que resultarían de continuar con el *status quo* o de aplicar algún proyecto de conservación. En general, los beneficios son decrecientes en el tiempo debido a la aplicación del factor de descuento, que asigna un mayor peso a los valores cercanos que a los lejanos. Los beneficios del escenario de no conservar (línea gris en el panel A de la figura 1) son mayores en el presente que los beneficios de conservar (línea oscura), debido a que en el presente no se incurren en costos de conservación. Sin embargo, a medida que el tiempo pasa y se manifiestan los efectos *in situ* de la erosión, los beneficios de la política de conservar pueden ser mayores en el futuro a los beneficios de no conservar.

Figura 1. Métodos de estimación de costos y beneficios de conservación de suelos (Adaptado de Barbier 1996)



El segundo método relaciona las tasas de erosión observadas con pérdidas en la productividad del suelo y estima el valor del producto perdido a precios de mercado. En relación con la pérdida de productividad, algunos autores sugieren reducciones de 4% a 10% con la pérdida de los primeros 10 cm de suelos (Bakker et al. 2004; SCS 1977).

Dicho valor se compara con el de un escenario asociado a alguna tasa de erosión de referencia, que puede ser la nula o la natural. La línea oscura en el Panel B de la figura 1 muestra el flujo de beneficios observado y la línea gris el flujo de beneficios asociados a la erosión de referencia. Este método compara la distancia entre las dos líneas en algún momento del tiempo, digamos T , sin necesariamente evaluar dicha distancia en todo el período relevante, que daría como resultado el área C.

El tercer método (panel C de la figura 1) estima los costos de las medidas necesarias para restituir algunas de las propiedades del suelo perdidas por la erosión. La figura muestra el valor del producto marginal del uso de algún insumo productivo x , por ejemplo, fertilizantes, para reemplazar los nutrientes del suelo, bajo supuestos económicos convencionales (i.e., que dicho valor es decreciente a mayor uso del insumo, manteniendo el resto de los insumos a niveles constantes). Este método, al igual que el de pérdida de productividad, realiza la evaluación en un instante del tiempo.

La revisión de literatura sobre el tema de valoración económica de erosión de suelos agrícolas refleja que el método más frecuentemente utilizado es el de pérdida de la productividad (segundo método), con 16 de los 26 estudios citados (Cuadro 1). Los costos de la erosión estimados son distintos para cada caso analizado y se encuentran dentro de un rango del producto interno bruto agrícola situado entre el 0.36% (Grohs 1994) hasta el 55% para el caso de Malawi (Bishop 1995).

Los nutrientes más analizados en el costo de reemplazo son nitrógeno, fósforo y potasio. Estimaciones por Martínez-Casasnovas et al. (2006) encuentran que el 6% del nitrógeno y el 24% del fósforo se pueden perder por erosión hídrica, aunque estos porcentajes son sitio-específicos. Los costos como proporción del producto interno bruto agrícola son un poco menores a los de pérdida por productividad, pues están entre el 4% (Martínez-Casasnovas 2006, para España) y el 16% (Bishop y Allen 1989, para Mali) del producto agrícola. El método de costo-beneficio compara los flujos de

beneficios a valor presente que resultan de seguir con el *status quo* o de implementar algunas medidas de conservación de suelos. Los resultados más frecuentes de este método sugieren que el escenario de conservación provee mayores beneficios *in situ* a los productores que el escenario de no conservar.

En México, algunos estudios presentan los costos financieros que ocasiona la pérdida de suelo en la agricultura mexicana. En una estimación de la pérdida de productividad, Magulis (1992) sugiere que el efecto de la erosión en las explotaciones agrícolas (en términos de la soja, el maíz, el sorgo y el rendimiento de trigo) podría superar a los mil millones de dólares.

Con estos antecedentes en mente, el objetivo de este estudio es ofrecer una valoración económica *in situ* de la erosión de suelos agrícolas en la economía mexicana utilizando dos métodos de valoración económica que incluyen tanto la pérdida de productividad como la de costo de reemplazo por pérdida de nutrientes *in situ*.

La información sobre la erosión de suelos se obtuvo de una revisión exhaustiva de diversas fuentes constituida por tesis universitarias (de 1946-2006), resúmenes y memorias de congresos (1969-2000), artículos científicos (~1980-2006) y diversos informes, que juntos sumaron 140 estudios realizados entre 1960-2006 (Cuadro 2).

Los estudios muestran una tendencia creciente a partir de la década de los 80, presentando su mayor auge en la década de los 90 (figura 1). A pesar de la gravedad de la situación ambiental, pareciera que los esfuerzos para estudiar la erosión de suelos en México están perdiendo terreno en lo que va del siglo XXI.

En las últimas décadas, los esfuerzos de investigación han impulsado el desarrollo de varias metodologías cuantitativas y cualitativas. Entre las primeras dominan el cálculo de la pérdida de suelo a nivel puntual y experimental mediante parcelas de escorrentía, las cuales abarcan el 45% de los estudios. Los estudios elaborados mediante modelos, como la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE, por sus siglas en inglés), cubren el 32% del total, abarcando superficies de distinto tamaño (parcelas, laderas, cuencas y región). El interés principal de los estudios se ha enfocado a cuantificar la erosión a nivel parcelario (68% de los estudios) y con menos intensidad en otras escalas (ladera 16%, cuenca 10% y región 6%), mediante la utilización de distintos métodos (figura 3).

Cuadro 1. Métodos utilizados para la valoración económica de la erosión de suelos agrícolas Metodología

Revisión	Estudio	Costo-Beneficio a valores presentes	Comparación estática		Comentario	Estudio de caso	Costo (% PIBA, etc.)
			Costo de reemplazo	Pérdida de productividad			
Enters 1998	Wiggins y Palma, 1980			X	Referencia: escenario con medidas de conservación	El Salvador	
	Cruz et al. 1988			X	Definición poco clara de "costo"	Filipinas	
	Bishop y Allen, 1989		X	X	No toma en cuenta costos de las medidas de conservación, ni los costos de fertilizantes	Mali	4% a 1.6% de producto interno agrícola
	Magrath y Arens, 1989			X	No incluye costos de conservación	Java, Indonesia	1.6% de producto interno agrícola
	Ehui et al 1990			X	Análisis para cinco sistemas agrícolas	Nigeria occidental	
	Norse y Saigal, 1989		X		Enfoque de balance de nutrientes	Zimbabwwe	
	Pagiola, 1993			X	Balance de nutrientes	Kenya	
	Grohs, 1994			X	No incluye costos de conservación		0.36% de producto interno agrícola
	Bishop, 1995			X	No incluye costos de conservación	Mali y Malawi	3% a 1.3% de producto interno agrícola (Mali), 1.7% a 55% de producto interno agrícola (Malawi)
	Barbier, 1996			X	No incluye costos de conservación	EE.UU. central	
	Eaton, 1996	X		X	Incluye cálculos de valores presentes	Malawi	
	Nelson et al. 1996b			X	Comparación de tres sistemas agrícolas	Filipinas	
Revisión para este estudio	Veloz, A et al. 1985	X			Compara VP con y sin medidas de conservación.	República Dominicana	Los beneficios de conservar son 1.23 veces mayores a los beneficios de no conservar
	Cruz et al. 1988		X		Nutrientes (N, P, K) evaluados a precios de mercado y a precios sombra	Filipinas	
	Pimentel et al. 1995		X	X	Insumos: fertilizante y agua	EE.UU., Java, India	Costos absolutos: \$27 mmd (US, reemplazo agua y fertilizantes), \$340 mdd (Java, productividad), \$245 mdd (India, reemplazo fertilizantes)

Lutz et al. 1994	X			Compara VP con y sin medidas de conservación (Zanjas derivadoras, terrazas, muros de roca)	América Central	Los beneficios de conservar de 7 de 11 sitios analizados (en Costa Rica, República Dominicana, Guatemala, Haití, Honduras y Panamá) fueron mayores a los de no conservar.
Norris y Batie 1987				Modelo econométrico sobre adopción de conservación	2 condados, Virginia, EE.UU.	La información y situación financiera juegan un papel central en las decisiones de conservar
Hopkins 1998	X			Identifica sustitución entre fertilización y nutrientes en el suelo, pero no entre fertilización y pérdida de profundidad	Calibración con datos de varias regiones de EE.UU.	La conservación es estrategia óptima.
Nkonya et al. 2008	X			Compara VP con y sin medidas de conservación.	2 regiones en Kenia	Los beneficios privados y sociales de conservar superan a los de no conservar
Alfson et al. 1996			x	Toma en cuenta los efectos económicos indirectos por medio de un modelo de equilibrio general computable	Nicaragua	Estima pérdidas anuales promedio de productividad entre 11 cultivos iguales a 1%. Efectos indirectos en el resto de la economía reduce el PIB global en 7% y eleva el nivel de precios en 2%.
Martínez-Casasnovas y M. Ramos 2006		X		Estima el costo de reemplazo de nitrógeno y fósforo en suelo perdido por lluvias en viñas.	Región de Panedés, España	El 6% del nitrógeno y el 26% del fósforo aplicado se pierde por erosión por lluvia. El costo de reemplazo representa 2.4% para N y 1.2% para P respecto al total de ingresos por la venta de las uvas.
Nyangena y Köhlin 2009			X	Compara rendimientos entre sitios con y sin medidas de conservación	Kenya	Los rendimientos son mayores con medidas de conservación después de controlar por la pendiente, el estado de la erosión, y la profundidad del suelo
García-Préchac y Durán 2001			X	Estima pérdidas de productividad para diversos tipos de suelo bajo uso agrícola y pecuario.	Uruguay	Alta correlación entre grado de erosión y pérdida de productividad.
Requier-Desjardins 2006			X	Meta-análisis de pérdida de productividad en tierras áridas	Global, Ruanda, Etiopía, Zimbabwwe, Lesotho, Malawi, Mali, Gana	Respectivamente (% PIBA): NA, 3.5%, 4%, 8%, <1%, 3%, <1%, 5%.
# Estudios	5	5	16			

Cuadro 2. Estudios revisados sobre erosión de suelos en México

Origen de cita	Años revisados
Tesis	
Universidad Autónoma de Chapingo	1946-2006
Colegio de Posgraduados	1970-2006
Universidad Nacional Autónoma de México	1990-2006
Universidad Autónoma de México	1990-2006
Resúmenes de Congresos	
Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo	1969-2000
Documentos internos	
Comisión Nacional del Agua	1980-2006
Instituto Nacional sobre Recursos Bióticos	1980-2006
Revistas	
<i>Terra</i>	1980-2006
<i>Agrociencia</i>	1990-2006
<i>Investigaciones Geográficas</i>	1990-2006
<i>Applied Soil Ecology</i>	1996-2004
<i>Advances in Soil Science</i>	1985-1992
<i>European Journal of Soil Science</i>	1994-2004
<i>Catena</i>	1980-2006
<i>Geomorphology</i>	1988-2006
<i>Geoderma</i>	1980-2006
<i>Soil Science Society of America</i>	1988-2005
<i>Soil Science</i>	1996-2006
<i>Soil Technology</i>	1988-2006
<i>Soil and Tillage Research</i>	1986-2006

Los datos recopilados presentan la situación de erosión de suelos en 140 sitios a lo largo del país. Si bien esta base de datos constituye una buena imagen de la situación nacional, no abarca todo el espectro de erosión de suelos. Por ello, con el afán de extrapolar estos datos a una mayor superficie se identificaron áreas con características similares a la base de datos recopilada, considerando variables detonadoras de este fenómeno como: el clima, el tipo de suelo, el uso de suelo (maíz de temporal) y la pendiente. Esta generalización se realizó a través de ArcView 3.1 y posteriormente mediante el cruce de coberturas digitales con ArcGIS 8.1 (figura 4).

El análisis económico se basó en maíz de temporal, el cual cubre la superficie agrícola más extensa del país

Figura 2. Estudios sobre erosión de suelos recopilados desde 1960 a 2006 en México

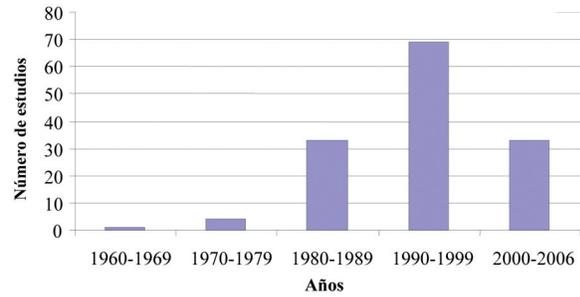
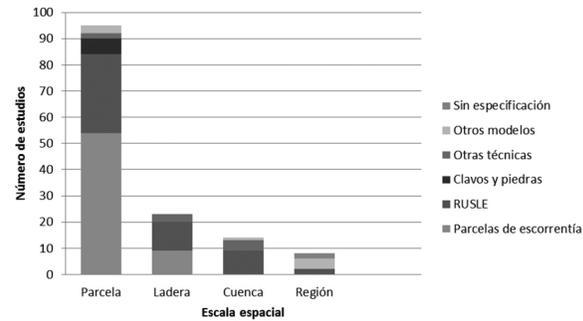


Figura 3. Metodologías utilizadas para evaluar erosión de suelos en México en función de la escala espacial



(Velez 2007). El rendimiento promedio nacional de este cultivo es de 2.2 ton/ha, con un costo promedio de US\$ 248/ton (SNIIM, 2010).¹

Evaluación económica de la pérdida de productividad por erosión de suelos

El valor económico de la pérdida de productividad por hectárea en un sitio determinado i se aproxima en este estudio con la siguiente ecuación:

$$C_i = P_m * \Delta y_{ij}$$

Donde C_i es el costo de la erosión por hectárea en el sitio i , P_m es el precio de mercado por tonelada de producto agrícola, y Δy_{ij} es la pérdida de producto en toneladas/ha asociada a la pérdida de centímetros de suelo en el sitio i . El subíndice j se refiere a los escenarios *conservador* y *crítico* de los extremos del rango de pérdida estimado por SAGARPA (2007). El escenario *conservador* supone

¹ La tasa de cambio utilizada es de 12.257 pesos por dólar al 1 de septiembre 2011.

Figura 4. Distribución de datos extrapolados de erosión de suelos

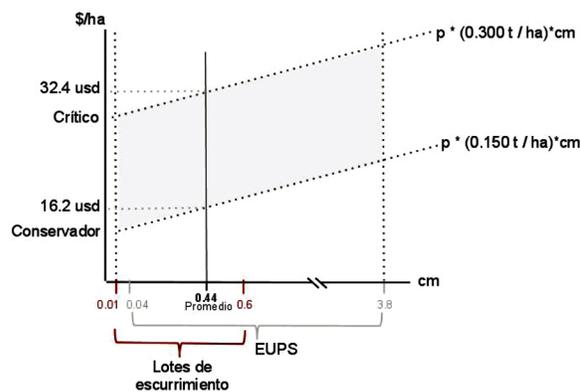


que se pierden 0.15 toneladas/ha por cada centímetro de suelo erosionado, mientras que en el *crítico* dicha pérdida es de 0.30 toneladas/ha. La pérdida de centímetros en los sitios de la muestra se estima con el promedio de lo reportado por los lotes de escurrimiento y por la ecuación universal de pérdida de suelo (EUPS), y los costos se estiman considerando los dos escenarios de pérdida de producto por centímetro erosionado propuestos por SAGARPA (2007). La figura 5 ilustra este procedimiento.

El eje vertical muestra el costo por hectárea y el horizontal, los centímetros de suelo erosionados. El método

de lotes de escurrimiento ofrece un rango entre 0.01 y 0.6 centímetros perdidos. El rango de la EUPS es mayor, y va de 0.04 a 3.8 centímetros perdidos. El promedio estimado de pérdida de suelos que se utilizará en este estudio será entonces de 0.44 cm. El precio de mercado utilizado es de \$248 USD por tonelada. Las líneas con pendiente positiva muestran los escenarios en función de los centímetros perdidos. El escenario *conservador* evalúa la pérdida de producto tomando como referencia el mínimo del rango estimado por SAGARPA (2007) (0.15 ton/ha), mientras que el escenario *crítico* lo hace con el máximo de dicho rango (0.3 ton/ha). La combinación de ambos rangos determina que los costos por pérdida de productividad caigan dentro del polígono.

Figura 5. Costos por hectárea bajo dos escenarios de pérdida de productividad por centímetro de suelo erosionado



Evaluación económica de la pérdida de nutrientes por erosión de suelos

La valoración económica por la pérdida de nutrientes se basó en un modelo de costo de reemplazo donde se consideraron las cantidades y el costo de fertilizantes requeridos para reemplazar los nutrientes medidos que cada parcela pierde a consecuencia de la erosión de suelos. Los fertilizantes más comunes en México incluyen urea, superfosfato simple y cloruro de potasio (Ávila 2001), cuyos costos se muestran en el Cuadro 3. El costo económico de la pérdida de nutrientes se estableció a partir

Cuadro 3. Costos de fertilizantes y de nutrientes

Fertilizante	Costo de fertilizante (US \$/Ton)*	Nutriente	Costo de nutriente (US \$/kg)
Urea	586.5	Nitrogeno	1.3
Superfosfato simple	284.3	Fósforo	1.4
Cloruro de potasio	655.1	Potasio	1.1

* Costo del fertilizante en septiembre de 2011.

de a) reporte de la pérdida promedio de nutrientes registrado en los estudios, b) costo de los fertilizantes.

Resultados

Los datos de erosión extrapolados cubren esencialmente tres tipos de suelos dominantes en México: Phaeozems, Regosoles y Vertisoles, cubriendo una superficie de 27,733.7 km² que correspondería aproximadamente al 10% de la superficie agrícola del país según estimaciones de Sánchez (2009). Esta área se ubica en climas sub-húmedos a templados en pendientes menores a 5°. Sin embargo, es importante señalar que generalmente la agricultura de temporal se practica en pendientes más pronunciadas, lo cual incide sobre la susceptibilidad del suelo a erosionarse más fácilmente.

Las principales diferencias con relación a los resultados de erosión de suelos se basan principalmente en la metodología utilizada para su estudio. Así, los resultados obtenidos de las parcelas de escorrentía muestran los valores más bajos de tasa de erosión (0.1 a 5.9 mm de suelo) mientras que los resultados obtenidos a través del modelo RUSLE tienden a ser mayores (0.4 a 32.8 mm de suelo).

Considerando el *escenario conservador* (donde 1 cm de suelo erosionado ocasiona la reducción de 150 kg en el rendimiento) el costo total de toda la extensión estudiada asciende a US\$ 44,921,545, lo cual corresponde a un valor de \$16.2 USD/ha. Con el *escenario crítico*

(donde 1 cm de suelo erosionado ocasiona la pérdida de 300 kg) el costo asciende a USD\$ 89,843,089, o bien \$32.4 US/ha.

Por otro lado, los costos asociados a la pérdida de nitrógeno, fósforo y potasio alcanzan USD\$ 6.2/ha, USD\$ 9.6/ha y USD\$ 6.3/ha, respectivamente. Por lo tanto, el costo total por pérdida de nutrientes en el área extrapolada equivale a USD\$ 18,545,637, lo cual corresponde a USD\$ 22.1/ha (Cuadro 4).

Es importante anotar que mientras este estudio se basa en datos que abarcan 27,733 km², alrededor de 1.4% del territorio nacional, el último informe sobre la degradación de suelos en México apunta que el 10% de la superficie nacional presenta erosión hídrica, lo cual sugiere que el costo puede incrementarse proporcionalmente.

El costo de la erosión en la superficie evaluada en términos del valor de la producción del maíz blanco de temporal (SIACON 2011) se encontraría en el rango de 4.2 a 7.2% para los escenarios conservador y crítico, respectivamente. Sin embargo, si se considera un comportamiento similar para el total nacional de la superficie de maíz blanco de temporal, este costo sería equivalente al 7.8 y al 11% del valor de producción para los escenarios mencionados. Partiendo de la premisa que los sistemas de producción se han mantenido en el tiempo, y considerando que la erosión es un proceso dinámico en el tiempo, se podría esperar que estas cifras podrían cambiar rápidamente hacia la alza, como se ha estado observando en los últimos años (Cotler y Martínez-Trinidad 2010).

Cuadro 4. Costos de pérdida de productividad y nutrientes por erosión, por hectárea

Escenarios	Costo de pérdida de rendimiento por erosión (US \$ por hectárea)	Costo de pérdida de nutrientes (US \$ por hectárea)	Costo total por hectárea (US \$)
Conservador	16.2	22.1	38.3
Crítico	32.4	22.1	54.5

CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

La valoración económica de la erosión de suelos realizada en este estudio busca aproximarnos al costo de sólo dos servicios ambientales que otorga el suelo: el mantenimiento de la producción a través de la profundidad del suelo y la presencia de macronutrientes, lo cual indudablemente no abarca el valor del suelo como sistema natural.

Sin embargo, los resultados obtenidos señalan que en México estamos perdiendo por lo menos el equivalente de 38.3 a 54.5 USD\$/ha, equivalentes al 4.2 a 7.2% del valor de producción del maíz.

A pesar del alto costo que resulta para el país la pérdida de este capital natural, los escenarios utilizados siguen subvalorando el problema. Primero, debido a que la productividad se explica por un amplio conjunto de variables edáficas que van más allá de las retomadas en este estudio. En ese sentido, Pimentel et al. (1993) mencionan que los efectos de la erosión medidos por la profundidad y los nutrientes podrían explicar la reducción de 0.1 a 0.5 % de la productividad, mientras que el total de las pérdidas generadas por erosión (impactos sobre la materia orgánica, la infiltración, la edafofauna, entre otros) puede ascender a rangos entre 15 a 30% de la productividad. Además, es necesario considerar que los nutrientes perdidos por erosión no se reemplazan de manera automática con el uso de fertilizantes. En los suelos erosionados, las condiciones hídricas decaen haciendo menos disponibles a los nutrientes, con lo cual disminuye la eficiencia de su utilización por las plantas.

Por otro lado, la subvaloración también se explica porque el estudio se centró en los impactos *in situ*, siendo que algunos estudios internacionales señalan que los costos *off situ* de la erosión de suelos pueden ser de mayor cuantía (Clark 1985).

A pesar de estas limitaciones, los resultados obtenidos dan una clara idea de la gravedad del problema, desde el punto de vista productivo y económico.

Hasta ahora la respuesta institucional ha sido limitada. Por un lado, mediante programas que subsidian prácticas mecánicas de conservación de suelos, costosas y difíciles de replicar. Por otro lado, a través de varios incentivos económicos. Uno de los más importantes es PROCAMPO (http://www.procampo.gob.mx/artman/publish/article_183.asp), donde el monto entregado varía de (USD \$ 80/ha a USD \$108 /ha), que dado los costos por pérdida de productividad mencionados an-

teriormente, significaría que la erosión de suelos agrícolas constituye del 48 al 51% del monto entregado por PROCAMPO.

La mayoría de los estudios de erosión de suelos en México se centran en la pérdida de suelo a nivel de parcela, aunque el proceso de erosión hídrica adquiera su real magnitud cuando es analizada a nivel de cuenca hidrográfica (Kimble y Lal 1999). Por ello, el diseño y la implementación de los programas de política pública para la conservación de suelos deben integrar tanto los efectos *in-situ* como *off-situ*, a escala de cuenca, donde las externalidades son mayores.

Si bien "...debemos estar conscientes de que rara vez (si es que nunca) se conocerá a ciencia cierta el valor económico total de algo" (Sanjurjo e Islas 2007) una apreciación más completa del valor de los suelos requiere de estudios que enfatizen sobre los diversos servicios ambientales otorgados por los suelos, más allá de la producción.

A pesar de la limitación de los datos disponibles, nuestro análisis pone de relieve la importancia de introducir el factor económico de la erosión de suelos en la fórmula de las políticas propuestas para su atenuación.

REFERENCES

- Alfson K., M. De Franco, S. Glomsrod, T. Johnsen. 1996. The cost of soil erosion in Nicaragua. *Ecological Economics* 16 (2): 129-145.
- Ananda K., G. Herath. 2003. Soil erosion in developing countries: a socio-economic appraisal. *Journal of Environmental Management*, 68(4): 343-353.
- Avila J. 2001. El mercado de los fertilizantes en México, situación actual y perspectivas. *Problemas del Desarrollo* 32(17): 189-207.
- Bakker M., G. Govers, M. Rounsevell. 2004. The crop productivity-erosion relationship: an analysis based on experimental work. *Catena* 57(1): 55-76.
- Barbier, E. 1996. The economics of soil erosion: theory, methodology and examples. *EEPSEA Special Paper*. Economy and Environment Program for Southeast Asia, International Development Research Centre, Singapore.
- Barbier E.B. 1997. The economic determinants of land degradation in developing countries. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. Series B: Biological Sciences, 352(1356): 891-899.
- Barrios E. 2007. Soil biota, ecosystem services and land productivity. *Ecological Economics* 64: 269-285.

- Bishop J. 1995. The economics of soil degradation: an illustration of the change in productivity approach to valuation in Mali and Malawi. IIED Environmental Economics Programme, *Discussion Paper DP 95-02*, Londres. 77 p.
- Bishop J., J. Allen, B. Mundial. 1989. On-site costs of soil erosion in Mali. World Bank. Environment Working Paper No. 21, Washington D.C., 71 p.
- Bravo-Ureta B.E., D. Sol, H. Cocchi, Quiroga R.E. 2006. The impact of soil conservation and output diversification on farm income in Central American hillside farming. *Agricultural Economics* 35(3): 267-276.
- Clark E.H. 1985. The off-site costs of soil erosion. *Journal of Soil and Water Conservation* 40: 19-22
- Cohen M, Brown M, Sheperd K. 2006. Estimating the environmental costs of soil erosion at multiple scales in Kenya using synthesis. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 114: 249-269.
- Comisión Nacional de Población (CONAPO) 2008. La situación demográfica de México 2008, Mexico.
- Cotler H, Ortega M P. 2006. Effects of land use on soil erosion in a tropical dry forest ecosystem, Chamela watershed, Mexico. *Catena* 65: 107-117.
- Cotler H, Sotelo E, Dominguez J, Zorrilla M, Cortina S, Quiñones L. 2007. La conservación de suelos: un asunto de interés público. *Gaceta Ecológica* 83: 1-71. Instituto Nacional de Ecología, México.
- Cotler H. 2010 Evolución y perspectivas de la conservación de suelos. En: Lezama J.L. y Garizbord B. (Coord.) *Los grandes problemas de México, Vol. 4 Medio Ambiente*. El Colegio de México, pp.141-164.
- Cotler H. y Martínez S. 2010. An assessment of soil erosion costs in Mexico, 639-648. In: P. Zdruli et al. (eds) *Land degradation and desertification: assessment, mitigation and remediation*. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York.
- Cruz W., H.A. Francisco, Conway Z.T. 1988. The on-site and downstream costs of soil erosion in the magat and pantabangan watersheds. *Journal of Philippine Development* 15(1):85-112.
- Eaton D. 1996. The economics of soil erosion: a model of farm decision-making. International Institute for Environment and Development (IIED). Environmental Economics Programme, *Discussion Paper DP 96-01*. 48 p.
- Ehui Thomas W., K. Simeon, Preckel P.V. 1990. Forest resource depletion, soil dynamics, and agricultural productivity in the tropics. *Journal of Environmental Economics and Management*, 18(2): 136-154.
- Enters T. 1998. Methods for the economic assessment of the on- and off-site impacts of soil erosion. *Issues in Sustainable Land Management* Vol. 2, International Board for Soil Research and Management, Bangkok. 60 p.
- Ezcurra E., Aburto O., Rosenzweig L. 2009. Los riñones del mundo: ¿por qué debemos proteger los manglares de México? *Investigación Ambiental* 1(2): 202-206.
- Estrada J, Ortiz S C 1982. Plano de erosión hídrica del suelo en México. *Geografía agrícola* 3: 23-27.
- Gamini J. 2003. Soil erosion in developing countries: a socio-economic appraisal. *Journal of Environmental Management* 68: 343-353
- García-Prézac F., Durán A. 2001 Estimating soil productivity loss due to erosion in Uruguay in terms of beef and wool production on natural pastures. En: D. E Scott, R. H. Mohtar, y G.C. Steinhardt. *Sustaining the Global Farm. Selected papers from the 10th International Soil Conservation Meeting held May 24-29, 1999 at Purdue University and the USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory*. p 40-45.
- García L R.1983. Diagnóstico sobre el estado actual de la erosión en México. *Terra* 1 (1): 11-14
- Grohs F.1994. Economics of soil degradation, erosion and conservation: a case study of Zimbabwe, *Farming Systems and Resource Economics in the Tropics* Vol. 14. Arbeiten zur Agrarwirtschaft in Entwicklungsländern. Kiel: Wissenschaftsverlag Vauk, 199 p.
- Hodson G, Dixon J. A. 1988. Measuring economic losses due to sediment pollution: logging versus tourism and fisheries. *Tropical Coastal Area Management*, April, 5-8
- Hopkins J.W. 1998. *Three essays on information and production economics*. PhD thesis, Agricultural, Environmental, and Development Economics Graduate Program, The Ohio State University.
- Kimble M.J., Lal R. 1999. Watershed management for mitigating the greenhouse effect, pp. 367-377. En: Lal R. *Integrated watershed management in the global ecosystem*. CRC Press, 395p.
- Lutz E., S. Pagiola, Reiche C. 1994. The costs and benefits of soil conservation: The farmers' viewpoint. *The World Bank Research Observer* 9(2):273.
- Maass J., C. Jordan, J. Sarukhan. 1988. Soil erosion and nutrient losses in seasonal tropical agroecosystem under various management techniques. *The Journal of Applied Ecology* 25: 595-607.
- Maass J M, García-Oliva F.1990. La investigación sobre erosión de suelos en México: un análisis de la literatura existente. *Ciencia* 41(3): 209-228.
- Magulis S. 1992. Back-of-the-envelope estimates of environmental damage costs in Mexico. World Bank. *Working Papers WPS 824*, Washington D.C. 27 p.

- Magrath W., P. Arens .1989. Costs of soil erosion on Java: a natural resource accounting approach. World Bank. *Environmental Department Working Paper* 18, 67 p.
- Martínez S. 2007. Estimación de la valoración económica de la erosión de suelos. INE working paper <http://www.ine.gob.mx/dgioece/cuencas/proyectos.html> Cited 28 May 2009.
- Martínez-Casasnova J A, Ramos M. C. 2006. The cost of soil erosion in vineyard fields in the Penedes-Anoia Region (NE Spain). *Catena* 68:194-199.
- Nelson R., R. Cramb, K. Menz, M. Mamicpic. 1996. Bioeconomic modeling of alternative forms of hedgerow intercropping in the Philippine upland using SCUAF. *Imperata Project Paper* 1996/2, Centre For Resource and Environmental Studies, Australian National University, Camberra.
- Nkonya E., P. Gicheru, J. Woelcke, B. Okoba, D. Kilambya, L. Gachimbi. 2008. On-site and off-site long-term economic impacts of soil fertility management practices: The case of maize-based cropping systems in Kenya. International Food and Policy Research Institute, *Discussion Paper* 00778, Environment and Production Technology Division, 26 p.
- Norris P.E., S.S. Batie.1987. Virginia farmers soil conservation decisions: An application of Tobiy analysis. *Southern Journal of Agricultural Economics* 19(1):79-90.
- Norse D., Saigal R.1993. National economic cost of soil erosion in Zimbabwe. En Munasinghe M. (ed.) *Environmental Economics and Natural Resource Management in Developing Countries*, CIDIE, Washington D.C. pp. 229-240.
- Nyangena W., G. Köhlin. 2009. Estimating returns to soil and water conservation investments- An application to crop yield in Kenya. School of Business Economics and Law, *Working Papers on Economics* 402, University of Gothenburg, 33 p.
- Pagiola S.1993. Soil conservation and the sustainability of agricultural production. Ph. D. Thesis, Food Research Institute, Stanford University.
- Pimentel D., J. Allen, A. Beers. 1993. Soil erosion and agricultural productivity. In D. Pimentel (ed) *World soil erosion and conservation*. Cambridge University Press.
- Pimentel D., C. Harvey, P. Resosudarmo (1995). Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. *Science* 267 (5201):1117-1123
- Requier-Desjardins M. 2006. The economic costs of desertification: a first survey of some cases in Africa. *International Journal of Sustainable Development* 9(2):199-209.
- SAGARPA 2007. Informe de diagnóstico de la degradación de suelos e impacto de los programas de conservación de suelos en México. <http://www.sagarpa.gob.mx/agricultura/info/sust/suelo/at-degrada.pdf>.
- SAGARPA 2008. Resumen Nacional por productos agrícolas. Servicio de información y estadística agroalimentaria y pesquera (SIAP) <http://www.siap.sagarpa.gob.mx/>.
- Sánchez S., Flores A., Cruz-Leyva I., Velázquez A. 2009. Estado y transformación de los ecosistemas terrestres por causas humanas. En: Sarukhán J. *Capital Natural de México vol II*, CONABIO, México, pp. 75-129.
- Sanjurjo E., Islas I. 2007. Las experiencias del Instituto Nacional de Ecología en la valoración económica de los ecosistemas para la toma de decisiones. *Gaceta Ecológica* 84-85: 93-105.
- Scherr S, Yadav S. 1996. Land degradation in the developing World: implications for food, agriculture and the environment to 2020. International Food and Policy Research Institute, *Discussion Paper* 14, Washington D.C.
- SEMARNAT-Colegio de Posgraduados 2002. Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana, escala 1:250,000. Memoria Nacional, SEMARNAT-Colegio de Posgraduados, México.
- Service of Soil Conservation -SSC 1977. Midwest Technical Service Center. TSC Advisory Soils L1-13, July 14.
- SIACON 2008. Sistema de Información Agropecuaria de Consulta. SAGARPA <http://www.siap.gob.mx>).
- Sistema Nacional de Información e Integración de Mercados -SNIIM Precios de mercado: granos básicos e insumos agrícolas. Sistema Nacional de Información e Integración de Mercados, Secretaría de Economía. <http://www.economia-sniim.gob.mx>> Disponible en http://www.oedrus-tamaulipas.gob.mx/cd_anuario_06/TS.html.
- Stocking M. 2003. Tropical soils and food security: the next 50 years. *Science* 302: 1356-1359.
- Stroosnijder L. 2005. Measurement of erosion: is it possible? *Catena* 64 (2-3): 162-173.
- Tengberg A, Stocking M, Dechen S.1998. Soil erosion and crop productivity research in South America, pp. 355-362. En: Blume H P, Eger H, Fleischhauer E, Hebel A, Reij C, Steiner KG (eds) *Towards sustainable land use. Advances in Geoecology volume I*; Catena-Verlag, Reiskirchen, Alemania.
- Vazquez A. V. 1986. La erosión y la conservación del suelo en México (realidades y perspectivas). *Terra* 4(2):158-172.
- Vélez F, Meléndez A, García H. 2007. Algunas consideraciones de política agropecuaria. En: Cotler P. (ed) *Políticas públicas para un crecimiento incluyente*. Universidad Iberoamericana, México
- Veloz A., D. Southgate, F. Hitzhusen, R. Macgregor. 1985. The economics of erosion control in a subtropical watershed: A Dominican case. *Land Economics*, 61(2):145-155.

Werner G. 1992. Suelos volcánicos endurecidos (tepetates) en el Estado de Tlaxcala: distribución, rehabilitación, manejo y conservación. *Terra* 10: 318-331.

Wiggins S.L., Palma O. 1980. Acelhuate river catchment management project, El Salvador. cost-benefit analysis of soil conservation. Land Resource Development Centre, *Project Report* 104, , Overseas Development Administration, 7 p.