

MEDICIÓN DE LA EROSIÓN EN CÁRCAVAS POR MEDIO DE IMÁGENES DE SATÉLITE

Gully Erosion Measurement with Satellite Images

Patricio Rivera Ortiz^{1‡}, Jesús Emmanuel Rivera Lárraga², Elizabeth Andrade Limas¹, Francisco de la Garza Requena¹, Blanca Castro Meza¹ y Francisco Belmonte Serrato³

RESUMEN

La erosión del suelo es una de las formas más agresivas de degradación de las tierras de cultivo y de cualquier otro uso. La región del Altiplano del estado de Tamaulipas, México, es un territorio semiárido ubicado al poniente de la Sierra Madre Oriental que presenta severos problemas de erosión. En la presente investigación se evaluó la erosión remontante en cárcavas, ocurrida en dos suelos agrícolas (Chihue y Alamar) del ejido San Antonio municipio de Jaumave, por medio de imágenes de satélite, utilizando el programa Arc Explorer 2^{MR}. Para estimar la erosión ocurrida durante el periodo de 2003 a 2010 se utilizaron imágenes de satélite de los años 2003 y 2006 así como las coordenadas geográficas de las cabeceras de las cárcavas, obtenidas *in situ* por medición directa sobre el terreno, en 2010. Las cárcavas en estudio crecieron en longitud 46.0 m en el sitio Chihue y 38.2 m en el sitio Alamar, lo que provocó una severa pérdida de suelo del orden de 7299.8 Mg y 2620.5 Mg respectivamente en esos siete años. Estas cantidades representan 1042.8 Mg de pérdida de suelo por erosión remontante cada año en la cabecera principal del primer sitio así como 374.4 Mg año⁻¹ en el segundo sitio. El desgaste del suelo por erosión remontante en las tierras cultivadas del ejido San Antonio, fue superior a la tasa de erosión considerada como tolerable: 1.8 Mg ha⁻¹ año⁻¹.

Palabras clave: degradación del suelo, erosión remontante.

¹ Facultad de Ingeniería y Ciencias, ² Graduado de Licenciatura de Ingeniería y Ciencias, Universidad Autónoma de Tamaulipas. Centro Universitario Adolfo López Mateos. 87149 Cd. Victoria, Tamaulipas, México.

[‡] Autor responsable (lida@uat.edu.mx)

³ Departamento de Geografía. Universidad de Murcia. Campus Merced. 30001 Murcia, España.

Recibido: abril de 2013. Aceptado: octubre de 2013.

Publicado en Terra Latinoamericana 32: 13-21.

SUMMARY

Soil erosion is one of the most aggressive forms of degradation of agricultural land or land with any other use. The Altiplano region of the state of Tamaulipas, Mexico, is a semi-arid area located west of the Sierra Madre Oriental and exhibits severe erosion. Remontant gully erosion occurring in two agricultural soils (Chihue and Alamar) of the ejido San Antonio was assessed using satellite images and Arc Explorer 2TM software. To estimate the erosion that occurred during the period 2003-2010, we used satellite images taken in 2003 and 2006. Geographic coordinates of the gully heads were obtained *in situ* through direct measurement on the ground in 2010. The gullies under study grew 46.0 m at the Chihue site and 38.2 m at the Alamar site, evidencing severe soil loss of about 7299.8 Mg and 2620.5 Mg, respectively, over the seven year period. These amounts represent 1042.8 Mg of soil lost by remontant erosion each year at the main head of the first site and 374.4 Mg year⁻¹ at the second site. Soil lost through remontant erosion on cultivated lands of the San Antonio ejido is higher than the rate of erosion considered tolerable: 1.8 Mg ha⁻¹ year⁻¹.

Index words: degradation of soil, remontant erosion.

INTRODUCCIÓN

La región del altiplano del estado de Tamaulipas, México, es un territorio semiárido que presenta severos problemas de erosión, tanto de tipo eólica como hídrica, provocando la pérdida de la capa superficial del suelo y acumulaciones de materiales transportados, así como la presencia de múltiples y profundas cárcavas debido a las precipitaciones pluviales que aunque son escasas son de tipo torrencial. En los predios de uso agrícola del ejido San Antonio, municipio de Jaumave, se tiene una severa erosión hídrica que ha generado cárcavas que desembocan en el río Chihue, en los puntos de

concentración de la escorrentía proveniente del sistema montañoso al poniente del área mencionada (Martínez-Menes *et al.*, 2009). Según Kirkby (1984), las cárcavas son canales superficiales formados cuando los arroyuelos se combinan, se desarrollan al grado de que no pueden ser eliminadas por las operaciones normales de labranza.

Cuando las cárcavas evolucionan con crecimiento en sentido contrario al flujo de agua de escorrentía, toman el nombre de cárcavas por erosión remontante. Este tipo de erosión puede ocurrir en suelos ubicados junto al cauce de un río, a través de la expansión de una cárcava que comienza como una incisión fluvial sobre el barranco a un lado del río. La incisión tiene lugar en el punto donde se concentra el mayor flujo de agua de escorrentía proveniente de áreas contiguas para desembocar en el cauce fluvial. La profundización de la incisión provoca el crecimiento de la cárcava por derrumbamiento al desplazarse sus cabeceras hacia atrás (Duque, 2007).

Los volúmenes de agua que se originan en la microcuenca que concurre en los suelos agrícolas del ejido San Antonio durante los periodos lluviosos, fluyen sobre la superficie de las tierras de cultivo, las cuales son planas o de muy poca pendiente (0 a 2%), al verse en las cárcavas que desembocan en el río, provocan la formación o crecimiento de grandes y profundas cárcavas de tipo remontante, disminuyendo la superficie productiva del terreno y provocando fuertes pérdidas de suelo. Debido a lo anterior la evaluación, prevención y búsqueda de una solución a esta problemática resulta esencial. El control de cárcavas remontantes se hace más urgente cuando la cabeza de ésta crece hacia arriba y hacia los lados, luego de cada temporada de lluvias y a menos que el proceso sea detenido oportunamente, pone en peligro el resto de la parcela (Rivera-Posada, 1998).

A nivel local o *in situ* los principales métodos para cuantificar el suelo que se ha perdido por erosión son: transectos de cárcavas, clavos con rondanas, corcholatas de botella y lotes de escurrimiento (Anaya *et al.*, 1977), mientras que de manera remota los métodos de evaluación de la erosión en cárcavas, basados en las imágenes de satélite, son las técnicas más apropiadas sobre todo en zonas semiáridas donde hay poco recubrimiento vegetal (García y Pérez, 2005). A partir de 1972, con el desarrollo del programa Landsat, el uso de imágenes digitales desde satélites se volvió frecuente en el estudio y evaluación de los recursos naturales en general, incluyendo estudios sobre erosión del suelo.

Los productos comercializados, obtenidos a partir de los sensores instalados en los satélites Landsat y SPOT han permitido la realización de inventarios y estudios sobre erosión de suelos de manera significativamente más precisa, pasando de un nivel regional a la evaluación del fenómeno a nivel local (Bocco y Valenzuela, 1988). Las imágenes de satélite Landsat TM se destacan por su alta resolución espacial y espectral y por poseer dos bandas del infrarrojo medio, óptimas para los estudios de suelos (Lee y Lee, 1988). El acceso a imágenes de diferentes sensores caracterizados por altas resoluciones espectrales, espaciales o temporales permiten analizar estos problemas desde distintos enfoques. La degradación de suelos representa un grave problema ambiental y debe ser abordado mediante información espacial actualizada. Para analizar variaciones multitemporales se ha utilizado también el proceso de detección de cambios mediante la diferencia entre imágenes. Este proceso consiste en restar los valores entre dos fechas, de forma que se obtiene una nueva imagen en la que se resaltan las diferencias entre ambas. En general las imágenes de satélite resultan muy útiles para analizar aquellos procesos que han producido modificaciones muy acusadas en la superficie del suelo (García y Pérez, 2005). Los grandes avances en el desarrollo de la Percepción Remota e Informática han posibilitado la gestión de los recursos naturales, incluyendo el suelo (Maya *et al.*, 2004). Sin embargo, a pesar de que la información contenida en las imágenes de satélite es de alta resolución, tanto espacial como espectral, existen algunos inconvenientes que particularmente en países subdesarrollados han impedido su aplicación en diferentes disciplinas. Entre estos inconvenientes se pueden señalar los altos costos de las imágenes en formato digital y los extensos tiempos para su adquisición (López y Palacio, 1995). En cuanto al estudio de la erosión en cárcavas, las imágenes de satélite pueden ser una herramienta útil para determinar la evolución de estos canales formados por erosión remontante, en ellas se puede observar la cabecera de la cárcava a diferentes tiempos y determinar la distancia de desplazamiento de la cabecera en los periodos de interés. El presente estudio se llevó a cabo con la finalidad de conocer el crecimiento de las cárcavas en el periodo de 2003 a 2010 y estimar las pérdidas de suelo y de superficie productiva del terreno provocadas por la erosión remontante en dos predios agrícolas del ejido San Antonio, municipio de Jaumave, Tamaulipas,

utilizando imágenes de satélite y medición directa de las dimensiones de las cárcavas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del Área de Estudio

El municipio de Jaumave se ubica al Oeste del estado de Tamaulipas. El área de estudio se localiza en el centro de este municipio, donde los terrenos son de uso agrícola y pecuario en el ejido San Antonio. Para evaluar la erosión hídrica en cárcavas en estos lugares se designaron dos sitios de estudio, afectados severamente por la erosión remontante, uno en el área agrícola (Chihue) y otro en potreros dedicados en el pasado a la producción de bovinos en agostadero (Alamar).

Sitio Chihue

En un área agrícola junto al río Chihue se seleccionó una cárcava representativa de un conjunto de grandes cárcavas (12 a 20 m de ancho) ramificadas y profundas (5 a 12 m) que desembocan en el margen derecho de dicho río. Esta cárcava se eligió debido a su mayor desarrollo y a que muestra una grave problemática de erosión remontante dentro de una parcela de cultivo. Este es el tipo de erosión que mayor degradación del suelo provoca en el área agrícola de la región. Varias parcelas agrícolas más han sido afectadas severamente por el crecimiento de las cárcavas, a pesar de que

cuentan con cobertura vegetal abundante, ya sea por las plantas de maíz y frijol que son los cultivos más utilizados o por la vegetación autóctona a base de plantas rastreras como *Cynodon dactylon*, *Malvastrum americanum*, *Clematis montevidensis* que crecen en los terrenos después de la cosecha. La desembocadura de esta cárcava en el río Chihue se localiza en las coordenadas 23° 35' 57.47" N y 99° 21' 13.93" O mientras que la cabecera se encuentra en 23° 35' 56.0" N y 99° 21' 25.5" O (Figura 1).

Sitio Alamar

Es un predio que en el pasado se dedicó a la producción de bovinos por pastoreo en agostadero, en él hay una cárcava de 2 a 4 m de profundidad. Se localiza en el km 130 de la carretera Cd. Victoria-Jaumave, cerca del cruce con el arroyo Alamar. Este arroyo es también un afluente del río Chihue y su desembocadura se localiza a unos 4 km al oriente de dicha carretera. A diferencia del sitio Chihue en este lugar la vegetación es escasa y está conformada por algunos zacates, arbustos y otras hierbas (*Acacia Farnesiana*, *Cenchrus ciliaris*, *Bothriochloa pertusa*, *Allionia incarnata* y *Parthenium hysterophorus*). La cabecera principal de la cárcava se encontró en las coordenadas 23° 33' 52.16" N y 99° 20' 35.17" O, mientras que el final del tramo estudiado se ubicó en las coordenadas 23° 33' 44.9" N y 99° 20' 46.5" O (Figura 2).



Figura 1. Conjunto de cárcavas junto al río Chihue, izquierda. Cárcava estudiada en el sitio Chihue, derecha. (Imágenes tomadas de Google Earth, Image 2010, Digital Globe).



Figura 2. Vista de la cárcava del sitio de estudio Alamar, junto a la carretera Cd. Victoria-Jaumave. (Imágen tomada de Google Earth, Image 2010, Digital Globe).

Características de los Suelos

El suelo dominante en los sitios de estudio es Fluvisol calcárico (García, 1982) que es un suelo profundo, de más de 2 m, derivado de depósitos aluviales por transportación fluvial y depósito de materiales, de permeabilidad moderada y buen drenaje superficial e interno, de topografía plana u ondulada y pendientes de 0 a 2%. Los suelos del área de estudio presentan textura franco arcillosa, alto contenido de carbonatos de calcio (más de 33%), pH medianamente alcalino (alrededor de 8) bajo contenido de sales solubles y sodio y nivel medio de materia orgánica (2 a 2.4% respectivamente). La densidad aparente en la capa superficial (0-50 cm) es en promedio 1.29 Mg m^{-3} mientras que a más de

50 cm de profundidad se tiene una densidad de alrededor de 1.5 Mg m^{-3} (Cuadro 1).

Cobertura Vegetal del Suelo

En el sitio Chihue, además de los cultivos de maíz (*Zea mays*) y frijol (*Phaseolus vulgaris*) se tiene una cobertura vegetal del suelo muy densa que impide la erosión laminar o en surcos. Sin embargo por su naturaleza y por los grandes flujos de agua de escurrimiento superficial la erosión remontante es muy intensa. Las principales especies silvestres encontradas (Treviño-Carreón, 2005) fueron: mezquite (*Prosopis alba*), huizache (*Acacia farnesiana*), zacate Johnson (*Sorghum halepense*), zacate buffel (*Cenchrus ciliaris*), zacate carretero (*Bothriochloa pertusa*), gramilla (*Cynodon dactylon*), (*Malvastrum americanum*), amargoso (*Parthenium hysterophorus*), chayotillo (*Xanthium stromarium*), girasol silvestre (*Thitonia tubiformis*), barba de chivo (*Clematis montevicensis*). En el sitio Alamar se tiene una cubierta vegetal escasa por lo que el suelo está más expuesto a la erosión. Las plantas más comunes en este sitio son: mezquite (*Prosopis alba*), huizache (*Acacia farnesiana*), zacate buffel (*Cenchrus ciliaris*), zacate carretero (*Bothriochloa pertusa*), (*Allionia incarnata*) y amargoso (*Parthenium hysterophorus*).

Precipitación Pluvial

La precipitación media anual en el área de estudio es de 554 mm según la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). En la Figura 3 se presenta la precipitación

Cuadro 1. Características de los suelos de los sitios Chihue y Alamar.

Características	Sitio			
	Chihue		Alamar	
Profundidad (cm)	0-50	50-130	0-50	50-110
Textura	Arcilla-limosa	Franco-arcilloso	Franco-arcilloso	Franco arcilloso
Arcilla (%)	44.8	36.8	40.8	36.8
Limo (%)	40.0	42.0	36.0	36.0
Arena (%)	15.2	21.2	23.2	27.2
pH	8.0	8.1	7.8	8.0
Conductividad eléctrica (mS cm^{-1})	0.3	0.2	1.3	1.88
Relación de adsorción de sodio	1.9	0.3	1.3	1.6
Materia orgánica (%)	2.4	2.1	2.1	2.0
Carbonatos totales (%)	36.8	46.3	33.6	38.9
Densidad aparente (g cm^{-3})	1.3	1.5	1.3	1.5

media de cada uno de los años correspondientes al periodo de estudio de la presente investigación (2003-2010). Los datos fueron proporcionados por la CONAGUA en 2012 de la estación meteorológica Plan de Ayala, Jaumave Tamaulipas, que es el punto de medición más cercano a los sitios experimentales y se encuentra aproximadamente a 5 km del sitio Chihue.

Medición del Avance de las Cárcavas por Erosión Remontante

Para estimar el crecimiento de las cárcavas por erosión remontante y la pérdida de suelo y superficie productiva asociada a este incremento, entre los años 2003 y 2010, se utilizaron imágenes de satélite Landsat, de alta resolución (60 cm de resolución pancromática por pixel). En cada uno de estos años se obtuvieron de las imágenes de satélite la posición de la cabecera principal de cada cárcava (Figura 4). Las coordenadas de las cabeceras durante el año 2010 se determinaron con base en la medición directa de la distancia de desplazamiento de la cabecera de la cárcava utilizando cinta métrica sobre el terreno.

La distancia entre cabeceras, que representa el crecimiento de la cárcava en cada periodo, se midió por medio del programa Arc Explorer 2^{MR} (ESRI, 2011), herramienta utilizada para medir la distancia entre dos puntos sobre las imágenes de satélite. Con la ayuda de este programa se midió en la imagen la distancia entre las coordenadas de los bordes de la cabecera entre 2003 y 2006 así como entre 2006 y 2010. Los datos de las coordenadas y distancias correspondientes al avance de las cabeceras de cada cárcava se presentan en el Cuadro 2.

Estimación de la Pérdida de Suelo por Erosión Remontante

Una vez estimado el desplazamiento de la cabecera principal de cada cárcava se midieron *in situ* la anchura y profundidad promedios en julio del año 2010 para cada una de las cárcavas estudiadas, en los tramos formados por erosión remontante desde el año 2003. Con esta información y los datos de la densidad aparente del suelo se calculó el área, volumen y peso de suelo perdido para cada periodo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Desplazamiento de la Cabecera Principal de la Cárcava y Pérdida de Suelo en el sitio Chihue

En el sitio Chihue los suelos estuvieron afectados principalmente por la erosión remontante. No se observó erosión laminar y en surcos debido a la abundante cobertura vegetal con base en zacates, plantas rastreras y cultivos de maíz y frijol así como a la pequeña pendiente de los suelos (de 0 a 2%). La baja o nula tasa de erosión laminar y en surcos en este sitio se debió también a que el agua de escorrentía no provino de la precipitación pluvial sobre los predios estudiados, sino que en su mayoría provino de las montañas aledañas a través de varios arroyos que vertieron el agua sobre el valle de los suelos de cultivo. Al ingresar grandes volúmenes de agua de escorrentía a estas tierras, la densa cubierta vegetal y la poca pendiente impidieron la erosión superficial pero se produjo por el contrario una intensa

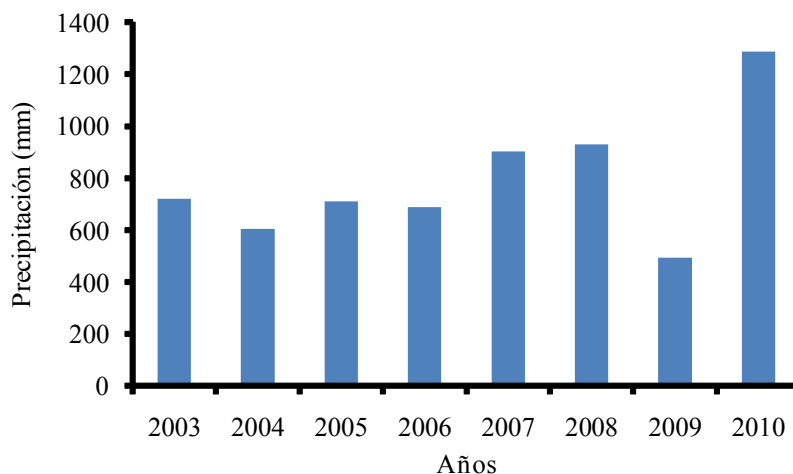


Figura 3. Precipitación media anual de 2003 a 2010 en los sitios de estudio. Fuente: CONAGUA (2012).



Figura 4. Imágenes de satélite de las cárcavas estudiadas Chihue (izquierda) y Alamar (derecha) que muestran la ubicación inicial de la cabecera principal. A partir de esta posición de la cabecera de cada cárcava, se midió el avance de las mismas sobre imágenes similares del año 2006. (Imágenes tomadas de Google Earth, Image 2010, Digital Globe).

erosión remontante al verterse el agua de escorrentía al lecho de las cárcavas en forma de cascada.

Se encontró que la cárcava del sitio Chihue creció en longitud 46 m en este período, lo que significó que la pérdida de suelo fue grande; se estimaron 5289.7 m³ en esos siete años, que representan 755.7 m³ (1042.8 Mg) en promedio de pérdida de suelo por erosión remontante cada año (Cuadro 3). Este tipo de erosión ocurrió debido al origen aluvial de los suelos, a los grandes volúmenes de agua que ingresaron desde las montañas aledañas, a través de varios arroyos, a las tierras de cultivo y a la presencia del río Chihue en la parte oriental del valle. El agua al desembocar en el río a través de la cárcava estudiada, provocó el crecimiento de ésta a razón de unos 6.6 m año⁻¹. Duque (2007), señala que la formación

de cárcavas sobre suelos aluviales con sedimentos areno-arcillosos, como los suelos en estudio, están condicionadas por el encajamiento de un curso fluvial próximo, con desplazamiento hacia una de las paredes del valle, de manera que la profundización del valle obliga a los barrancos a erosionarse aguas arriba, desplazando sus cabeceras hacia atrás.

Desplazamiento de la Cabecera Principal de la Cárcava y Pérdida de Suelo en el Sitio Alamar

Al igual que en el sitio Chihue este tipo de erosión ocurrió debido al origen aluvial de los suelos y a los grandes volúmenes de agua que ingresaron desde las montañas aledañas a los potreros y que al verterse

Cuadro 2. Coordenadas de la cabecera principal de las cárcavas de los sitios Chihue y Alamar durante dos periodos comprendidos del 2003 al 2010. Las coordenadas se obtuvieron de imágenes de satélite.

Período	Posición de la cabecera en 2003, con imagen del mismo año	Posición de la cabecera en 2006, con imagen del mismo año	Posición de la cabecera en 2010, por medición sobre imagen de 2006	Avance de la cabecera (m)
Sitio Chihue				
2003-2006	23° 35' 56.01'' N 99° 21' 23.45'' W	23° 35' 56.17'' N 99° 21' 24.18'' W		20.4
2006-2010		23° 35' 56.17'' N 99° 21' 24.18'' W	23° 35' 56.38'' N 99° 21' 25.03'' W	25.6
Sitio Alamar				
2003-2006	23° 35' 45.50'' N 99° 20' 45.48'' W	23° 38' 45.00'' N 99° 20' 46.02'' W		21.4
2006-2010		23° 38' 45.00'' N 99° 20' 46.02'' W	23° 33' 44.59'' N 99° 20' 46.39'' W	16.8

Cuadro 3. Crecimiento de la cárcava y pérdida de suelo por erosión remontante estimada en la cabecera principal del sitio Chihue, durante dos periodos comprendidos del 2003 al 2010. La estimación se hizo por medio de mediciones sobre imágenes de satélite.

Periodo	Avance de la cabecera	Ancho [†]	Profundidad [†]	Densidad aparente [†]	Pérdida de suelo	Pérdida de suelo
	----- m -----			Mg m ⁻³	m ³	Mg
2003-2006	20.35	16.5	8.00	1.38	2686.2	3707.0
2006-2010	25.65	35.0	2.90	1.38	2603.5	3592.8
Total	46.00				5289.7	7299.8
Promedio anual	6.57				755.7	1042.8

[†] valores promedio.

en forma de cascada sobre la cabecera principal de la cárcava estudiada, provocó el crecimiento longitudinal de la misma en aproximadamente 38.2 m de 2003 a 2010, lo que significa un incremento promedio de 5.5 m por año y una pérdida de suelo por erosión remontante de 374 Mg año⁻¹ (Cuadro 4).

En esta región las precipitaciones no son muy altas pero las lluvias ocurren a menudo de manera torrencial lo cual provoca avenidas grandes de escorrentía e intensa erosión remontante en las cárcavas. Como se puede observar en la Figura 3, la precipitación pluvial en el área de estudio fue de 600 a 700 mm en el periodo de 2003 a 2006 y entre 500 y casi 1300 mm en el periodo de 2006 a 2010. La elevada precipitación en el último año (casi 1300 mm) se debió a la ocurrencia del huracán Alex, que provocó escurrimientos excepcionales y por lo tanto una intensa erosión remontante en el año 2010; debido a este huracán la cárcava del sitio Chihue creció más de 20 m en la cabecera principal.

Degradación del Suelo en los Predios Chihue y Alamar

La erosión remontante fue mayor en el sitio Chihue en comparación con la localidad de Alamar, aunque en ambos lugares la afectación del suelo fue muy grande.

En el primer sitio el área agrícola afectada por el avance de la cárcava en su cabecera principal fue en promedio 176 m² por año, mientras que en el segundo el área perturbada por esta erosión cada año fue de 76 m² en la cabecera principal. La diferencia entre ambos sitios se debió a que en la localidad de Chihue el caudal máximo de agua de escurrimiento en la cárcava estudiada, calculado por la ecuación de Manning (Chow, 1994) fue mayor (14.216 m³ s⁻¹) en comparación con el caudal de la cárcava del sitio Alamar (1.845 m³ s⁻¹).

La pérdida de suelo estimada en el presente estudio fue superior a la tasa de erosión considerada como tolerable: 1.8 Mg ha⁻¹ año⁻¹ (Torres, 1981). La superficie dañada por la incursión de las cárcavas en las tierras de siembra también fue muy superior a las cifras anuales reportadas en otros lugares de México y el mundo. Romero (2002) afirma que la pérdida de suelo estimada mediante la ecuación universal RUSLE en la región de Murcia España, fue en promedio de 30 a 40 Mg ha⁻¹ año⁻¹ (0.003 a 0.004 Mg m⁻² año⁻¹) valor considerado como moderado. Casali *et al.* (1999) estimaron la pérdida de suelo en 266 Mg ha⁻¹ año⁻¹ (0.0266 Mg m⁻² año⁻¹) en Navarra, España y consideró esta cifra como una merma por encima de niveles tolerables. Pereyra *et al.* (2005) señalaron como muy altas las pérdidas de suelo de 224 Mg ha⁻¹ año⁻¹ (0.0224 Mg m⁻² año⁻¹) estimadas en

Cuadro 4. Crecimiento de la cárcava y pérdida de suelo por erosión remontante estimada en la cabecera principal del sitio Alamar durante dos periodos comprendidos del 2003 al 2010. La estimación se hizo por medio de mediciones sobre imágenes de satélite.

Periodo	Avance de la cabecera	Ancho [†]	Profundidad [†]	Densidad aparente [†]	Pérdida de suelo	Pérdida de suelo
	----- m -----			Mg m ⁻³	m ³	Mg
2003-2006	21.4	14.0	3.5	1.4	1048.6	1468.0
2006-2010	16.8	14.0	3.5	1.4	823.2	1152.5
Total	38.2				1871.8	2620.5
Promedio anual	5.5				267.4	374.4

[†] valores promedio.

suelos de Veracruz, México. En Segovia, España, se produjeron tasas de exportación de sedimentos próximas a las 10 Mg ha⁻¹ para una cantidad de precipitación de 39 L m⁻² en 72 horas, en cárcavas desarrolladas sobre sedimentos arenosos arcósicos (Duque, 2007), lo cual representa una pérdida de suelo de alrededor de 300 Mg ha⁻¹ año⁻¹ (0.03 Mg m⁻² año⁻¹).

Dentro de la superficie agrícola ubicada junto al río Chihue, donde se encuentra una de las cárcavas estudiadas, existen además otras cinco cárcavas de dimensiones similares que desembocan en este río, con lo cual se multiplica la superficie afectada por la degradación de los suelos debida a la erosión remontante.

CONCLUSIONES

- La degradación del suelo por erosión remontante fue muy severa en las tierras de siembra del ejido San Antonio en el periodo de 2003 a 2010, debido al crecimiento de las cárcavas dentro de las parcelas. El avance de las cabeceras en sentido contrario al flujo de agua de escorrentía fue de entre 5.5 y 6.6 m año⁻¹ (374 a 1042.8 Mg año⁻¹) lo que representa una pérdida de la superficie productiva del suelo de 76 a 176 m² año⁻¹ (267 a 756 m³ año⁻¹) en las cabeceras principales de las cárcavas Chihue y Alamar. Pérdidas similares ocurren en otras muchas cárcavas (más de 10) que invaden a las tierras productivas y que vierten sus aguas en el río Chihue, provocando un deterioro irreversible de las tierras productivas del ejido, debido a la profundidad de las cárcavas de más de 3.5 m.

- La pérdida de suelo por erosión remontante en las tierras de cultivo del ejido San Antonio, es superior a la tasa considerada como tolerable: 1.8 Mg ha⁻¹ año⁻¹.

- La erosión de los suelos en el ejido San Antonio es un problema grave que debe ser atendido a la mayor brevedad ya que de no hacerlo, en un tiempo relativamente corto, la mayoría de las tierras cultivadas podrían perderse irreversiblemente.

-Para detener el problema de erosión es necesario evitar que los grandes volúmenes de agua de escorrentía fluyan por encima de las parcelas. Esto se lograría con la construcción de canales revestidos de concreto para el desfogue del agua, con desembocadura en el río Chihue, a fin de desviar los diversos cauces antes de que la escorrentía penetre y erosione las superficies de siembra.

Aunado lo anterior, se deben diseñar y realizar prácticas de conservación de los suelos que prevengan los procesos de erosión y que permitan restaurar parte de las tierras degradadas.

LITERATURA CITADA

- Anaya Garduño, M., R. García Lagos y E. Fernández Lira. 1977. Manual de conservación del suelo y del agua. Escuela Nacional de Agricultura, Colegio de Postgraduados, Dirección General de Conservación del Suelo y Agua. México, D. F.
- Bocco, G and C. R. Valenzuela. 1988. Integration of GIS and image processing in soil erosion studies using ILWIS. *Int. J. Appl. Earth Observ. Geoinformat.* 309-319.
- Casalí, J., J. J. López y J. V. Giráldez. 1999. Erosión por cárcavas efímeras en el sur de Navarra, España: Descripción y Cuantificación. *Ing. Agua* 6: 251-258.
- Chow, V. T. 1994. Hidráulica de canales abiertos. Mc Graw-Hill. Bogotá, Colombia.
- Duque, J. F. M. 2007. Erosión hídrica en cárcavas y barrancos de la provincia de Segovia, España. Aulados.net, portal de cursos y documentos on-line: Geología y Yacimientos Minerales. www.aulados.net (Consulta: abril 15, 2010).
- ESRI (Environmental Systems Research Institute). 2011. Programa ArcExplorer2^{MR}. <http://www.esri.com/software/arcgis/explorer/index.html> (Consulta: junio 4, 2013).
- García, L. R. 1982. Integración de las unidades de suelo del estado de Tamaulipas. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. México, D. F.
- García R., P. y M. E. Pérez G. 2005. Degradación de suelos en Castilla La Mancha: Estudio de áreas piloto mediante teledetección. *Observat. Medioamb.* 8: 55-71.
- Kirkby, M. J. y R. P. C. Morgan. 1984. Erosión de suelos. Limusa. México, D. F.
- Lee, K. S. G. B. Lee, and E. J. Tyler. 1988. Thematic mapper and digital elevation modeling of soil characteristics in Hilly Terrain. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52: 1104-1107.
- López B., J. y J. L. Palacio P. 1995. Cuantificación del crecimiento de las áreas erosionadas en cabeceras de cárcavas procesando imágenes de video. Instituto de Geografía, UNAM. *Investigaciones Geográficas, boletín número especial* 3: 77-100.
- Martínez-Menes, M. R., E. Rubio-Granados, J. L. Oropeza-Mota y C. Palacios-Espinosa. 2009. Control de cárcavas. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. México, D. F.
- Maya, Y., B. Lacaze, M. Monteforte y M. F. Passini. 2004. Análisis de imágenes SPOT: Erosión en la región montañosa del sur de la península de Baja California, México. *Terra Latinoamericana*, 22: 23-34.
- Pereyra D., D., L. Gómez R. y F. Loeza H. 2005. Pérdida de suelo por erosión hídrica. pp. 61-84. *In: F. Rivera T., A. Gutiérrez L., R. Val S., R. Mejía S., P. A. Sánchez R., J. Aparicio M., L. L. Díaz L. (eds.). La medición de los sedimentos en México. Ediciones IMTA-UJAT. Jiutepec, Morelos/Villa Hermosa, Tabasco, México.*

- Rivera-Posada, J. H. 1998. Control de cárcavas remontantes en zonas de ladera mediante tratamientos biológicos. *Avances Técnicos Cenicafe* No. 256. Colombia.
- Romero D., A. 2002. La erosión en la región de Murcia. Universidad de Murcia. Servicio de publicaciones. Murcia, España.
- Torres R., E. 1981. Manual de conservación de suelos agrícolas. Diana. México, D. F.
- Treviño-Carreón, J. y A. Valiente-Banuet. 2005. La vegetación de Tamaulipas y sus principales asociaciones vegetales. pp. 22-46. *In*: L. Barrientos Lozano, A. Correa Sandoval, J. V. Horta Vega y J. García Jiménez (eds.). *Biodiversidad Tamaulipeca Vol. 1*. Instituto Tecnológico de Cd. Victoria, DGEST-SEP. Cd. Victoria, Tamaulipas, México.