

# BASE DE DATOS DE VOLÚMENES DE AGUA Y SEDIMENTO EN SUBCUENCAS COSTERAS DE MÉXICO

## WATER AND SEDIMENT VOLUME DATABASE IN MEXICO COASTAL SUB-BASINS

Fernando Paz-Pellat<sup>1†</sup> y Víctor Salas-Aguilar<sup>2</sup>

<sup>1</sup> GRENASER, Colegio de Postgraduados, Texcoco, Estado de México.

<sup>2</sup> Geoinformática, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Carretera Cuauhtémoc-Anáhuac Km 3.5, Ejido Cuauhtémoc, 31600 Cd. Cuauhtémoc, Chih.

<sup>†</sup> Autor para correspondencia: ferpazpel@gmail.com

### RESUMEN

La estimación del escurrimiento y sedimentos en las cuencas costeras es un insumo básico para determinar los flujos tierra-océano. Los sedimentos se producen por la erosión de las cuencas hidrológicas, por lo que es necesaria su investigación, así como las tasas de entrega y de enriquecimiento. Los balances de los ciclos biogeoquímicos en tierra-atmósfera-océanos requieren de información de las cuencas hidrológicas, la cual generalmente no está disponible y es necesario estimarla a través de modelos. En este trabajo se desarrolló un modelo empírico en función de datos meteorológicos, topográficos y de uso del suelo y vegetación, el cual se calibró mediante el uso de datos hidrométricos disponibles en México. Los resultados muestran buena correlación para el caso de los volúmenes de agua, pero menor para los sedimentos. El modelo generado se aplicó a la base de datos, periodo 2003-2012, de subcuencas costeras de México, para obtener promedios a largo plazo, los cuales se incorporaron a una base de datos del país, puesta a disposición del público.

**Palabras clave:** erosión; ciclos biogeoquímicos; modelo empírico; flujos laterales; subcuencas no reguladas.

### ABSTRACT

The estimation of runoff and sediments in the coastal basins is a basic input to determine the land-ocean flows. The sediments are produced by the erosion of the hydrological basins, so it is necessary to determine them, as well as delivery and enrichment rates. The balances of the biogeochemical cycles land-atmosphere-oceans require information from the hydrological basins, which is generally not available, so it is necessary the use of models. In this paper an empirical model was developed based on meteorological, topographic and land use data and vegetation, which was calibrated using hydrometric data available in Mexico. The results show good correlation for the case of water volumes, but less for sediments. The generated model was applied to the database, period 2003-2012, of coastal sub-basins of Mexico, to obtain the long-term averages, which were incorporated into a database of the country, made available to the public.

**Key words:** erosion; biogeochemical cycles; empirical model; lateral flows; unregulated sub-basins.

## INTRODUCCIÓN

El transporte de sedimentos de las cuencas hidrológicas costeras hacia los océanos ha sido materia de estudio por varias décadas (Milliman y Meade, 1983; Jansson, 1988; Walling y Webb, 1987 y 1996; Syvitski *et al.*, 2003), en particular con relación a los balances del carbono (Schlesinger y Melack, 1981; Meybeck, 1982 y 1993; Hope *et al.*, 1994; Cole *et al.*, 2007; Li *et al.*, 2017; Drake *et al.*, 2018). Las estimaciones del carbono orgánico e inorgánico, exportado por las cuencas costeras, cobra especial importancia en los últimos años en los balances globales de gases efecto invernadero, con valores estimados cada vez mayores (Ward *et al.*, 2017; Drake *et al.*, 2018). Aun cuando inicialmente se creía que las corrientes de agua eran conductos pasivos del carbono y otros componentes, la inclusión de los flujos hacia la atmósfera y la deposición de materiales durante su ruta al océano, se consideran muy importantes (Cole *et al.*, 2007; Chappell *et al.*, 2013). Desde esta perspectiva, es indispensable realizar estimaciones de los sedimentos y sus elementos (*i.e.* carbono) exportados al océano por los procesos continentales.

La erosión de los suelos de las cuencas hidrológicas es la fuente de sedimentos a la salida de éstas (Lal, 1995; Walling y Webb, 1996; Smith *et al.*, 2001; Chappell *et al.*, 2015). La producción de sedimentos generalmente se calcula mediante la tasa de entrega de sedimentos,  $TES = \text{Sedimentos}/\text{Erosión}$  (Walling, 1983; USDA-SCS, 1984), por lo que es necesario estimar la erosión bruta en las cuencas, mediante enfoques de modelación, relaciones empíricas u otros (Starr *et al.*, 2000), como los modelos de erosión USLE (Wischmeier y Smith, 1978) y RUSLE (Renard *et al.*, 1991), que se usan en forma común (Smith *et al.*, 2001; Martínez-Méndez *et al.*, 2001; Polyakov y Lal, 2004; Ramírez-León y Aparicio, 2009). En términos de los elementos constitutivos de los sedimentos, se utiliza la tasa de enriquecimiento,  $TE = \text{Elemento Sedimentos}/\text{Elemento Cuenca}$  (Walling, 1983), la cual es función del material fino erosionado transportado (Lal, 1995; Chappell *et al.*, 2013). La TES y TE pueden estimarse de las pérdidas del suelo por erosión (Starr *et al.*, 2000; Schiettecatte *et al.*, 2008; Chappell *et al.*, 2015), usando relaciones potenciales o por medio de variables relacionadas con los gastos de agua, área de la cuenca, topografía, clima, usos del suelo, suelos y litología, principalmente (Walling, 1983; USDA-SCS, 1984). Para poder estimar sedimentos, o sus elementos, es

necesario calcular, primero, la erosión de las cuencas y los elementos del suelo original o erosionado.

En la perspectiva del uso de estaciones hidrométricas a la salida de las cuencas, donde se mide el gasto (volumen/tiempo) de sedimentos ( $Q_s$ ) y agua ( $Q$ ), generalmente se obtiene un modelo potencial que relaciona ambos tipos de gastos:  $Q_s = aQ^b$  (Leopold *et al.*, 1964; USDA-SCS, 1984), en donde los parámetros  $a$  y  $b$  son función del tipo de uso del suelo y vegetación (Dunne, 1979; Lal, 1985; Dedkov y Mozzherin, 1996), principalmente. En cuencas no instrumentadas, el gasto de sedimentos y volúmenes, puede estimarse con regresiones estadísticas en función del área de la cuenca, clima, topografía, litología, suelo, uso del suelo y vegetación (Anderson, 1954; Langbein y Schumm, 1958; Jansen y Painter, 1974; Ludwig y Probst, 1996; Syvitski *et al.*, 2003; Beusen *et al.*, 2005; Muñoz-Salinas y Castillo, 2013 y 2015).

En el caso de México, las estimaciones de flujos laterales tierra-océano son escasas y a escala local o regional (Pou-Alberú y Pozos-Salazar, 1992; Smith *et al.*, 2008), por lo que es necesario desarrollar una base de datos con estimaciones de sedimentos a escala de país, como primera aproximación para la realización de balances de materia (*i.e.* carbono). Las corrientes de agua de México se han caracterizado en términos generales (Hudson *et al.*, 2005; Benke, 2009; Alcocer y Bernal-Brooks, 2010) para diferentes aplicaciones. En algunos casos se realizaron estimaciones de sedimentos en vasos de almacenamiento o presas, con información de batimetrías y modelos de erosión (García-Aragón *et al.*, 2007; Campos-Aranda, 2012; Estrada-Gutiérrez *et al.*, 2015), pero los resultados son difíciles de generalizar a escala de país y subcuencas costeras.

En este trabajo se presentan estimaciones de volúmenes de sedimentos y agua en todas las subcuencas costeras de México, promedio del periodo 2003-2012, utilizando un modelo de regresión estadística multivariada que considera variables climáticas, topográficas y de uso del suelo y vegetación. La base de datos que se generó, se documentó y está disponible en un sitio de descarga en internet ([http://pmcarbono.org/pmc/bases\\_datos/](http://pmcarbono.org/pmc/bases_datos/)).

## MATERIALES Y MÉTODOS

Aun cuando existen estimaciones de la erosión hídrica a nivel de país (Bolaños *et al.*, 2016), la información es cualitativa, por lo que su uso se limita a la estimación del transporte de sedimentos tierra-

océano. La alternativa, para su uso en el desarrollo de modelos empíricos para estimaciones en cuencas no instrumentadas, es el empleo de las bases de datos de estaciones hidrométricas, en donde existan datos de gastos de sedimentos y agua.

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) tiene bases de datos diarias de mediciones de gastos de agua y sedimentos (CONAGUA, 2013), las cuales pueden utilizarse en ejercicios de modelación hidrológica.

Aunque también existen datos hidrométricos de la Comisión Federal de Electricidad (de la Peña *et al.*, 1990), éstos no estuvieron disponibles para su uso en el ejercicio que se presenta en este trabajo. La Figura 1 muestra las subcuencas hidrológicas (n=287) con datos de sedimentos en México de la base de datos BANDAS (Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales) de la CONAGUA (2013).

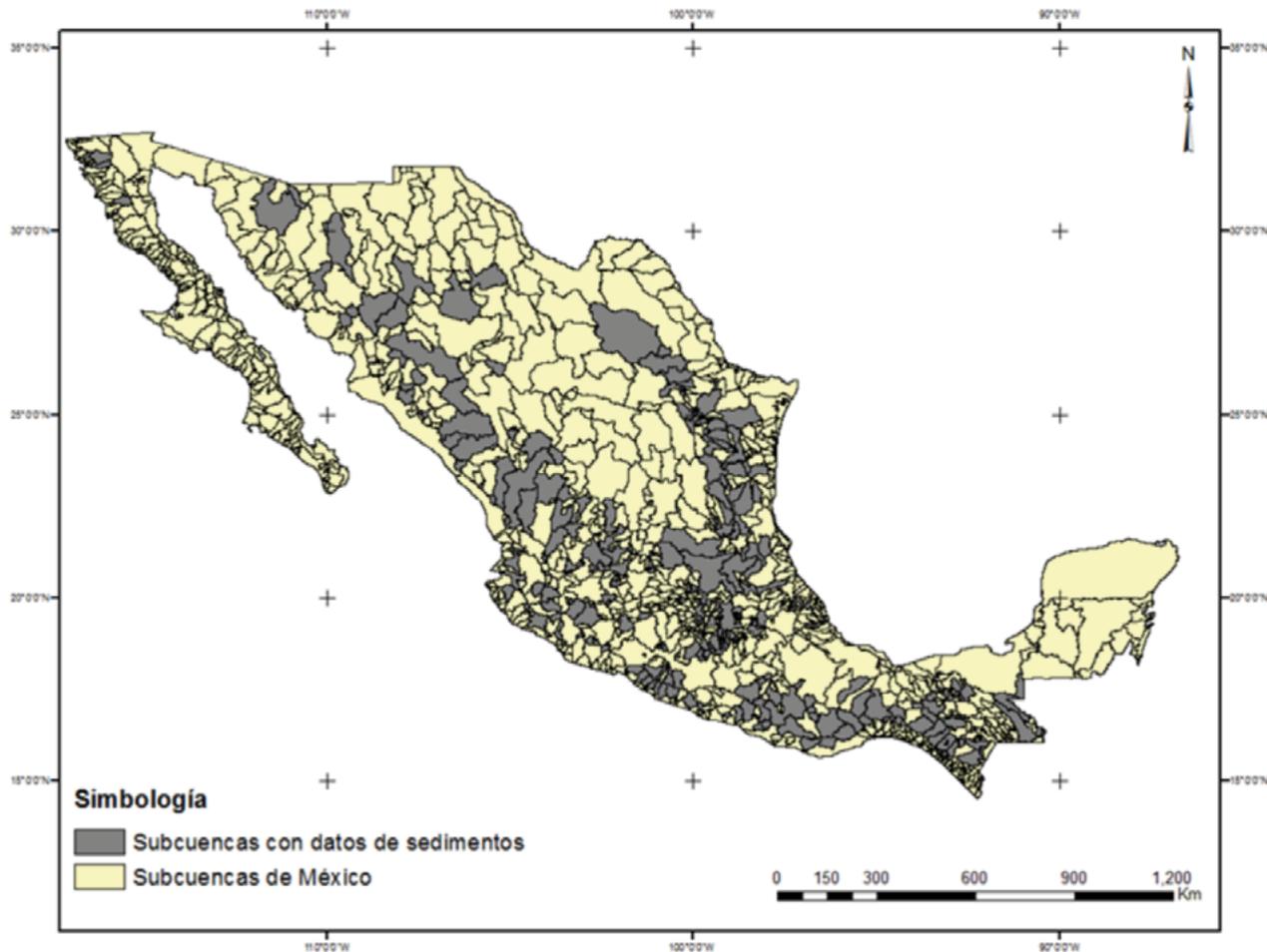


Figura 1. Subcuencas de México con datos de sedimentos.

Las subcuencas costeras con datos de información de sedimentos se muestran en la Figura 2 y corresponde

a 23 subcuencas, aun cuando solo 17 contienen información anual por 10 o más años.



Figura 2. Subcuencas costeras de México con datos de sedimentos.

La base de datos del BANDAS que se analizó corresponde al trabajo de Salas-Aguilar y Paz-Pellat (2018a), la cual utiliza información diaria y subcuencas delimitadas para cada estación hidrométrica, en donde se han estimado variables meteorológicas como precipitación (P) y evapotranspiración potencial (ET<sub>o</sub>) por el método de Hargreaves (Hargreaves y Samani, 1985), además de los usos del suelo y vegetación asociados a los mapas 1:250 000 del Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI) y variables topográficas (altura mínima o H<sub>min</sub>, altura máxima o H<sub>max</sub> y rango de alturas o H<sub>rango</sub>). La información meteorológica proviene, también, de la base de datos generada por Salas-Aguilar y Paz-Pellat (2018b).

Para realizar estimaciones del promedio de largo plazo de los volúmenes de sedimentos y agua en las subcuencas costeras de México, se analizaron

los promedios de subcuencas con datos anuales completos y de registros mayores o iguales a 10 años, lo que resultó en un total de 146. La base de datos usada en la modelación empírica consistió de mediciones de volúmenes de agua y sedimentos, de variables asociadas Prec, ET<sub>o</sub>, área de la subcuenca (A), H<sub>min</sub>, H<sub>max</sub>, H<sub>rango</sub> y coberturas (%) de usos del suelo y vegetación, descritas en Salas-Aguilar y Paz-Pellat (2018b).

Los promedios de largo plazo de los volúmenes de agua y sedimentos, periodo 2003-2012, se consideraron como asociados al balance hídrico  $P = Q + ET$ , con  $ET =$  evapotranspiración real, donde el almacenamiento de agua en el suelo es despreciable, de acuerdo con los diagramas tipo Budyko (1974). Las coberturas de los tipos de suelo y vegetación en las subcuencas instrumentadas se plantearon en función del modelo (Fu, 1981; Zhang *et al.*, 2004):

$$\frac{Q}{P} = \left[ 1 + \left( \frac{ET_o}{P} \right)^w \right]^{\frac{1}{w}} - \frac{ET_o}{P} \tag{1}$$

donde  $ET_o$  es la evapotranspiración potencial y  $w$  (2 a 4) es un parámetro relacionado con las características de la cuenca.

Para las clases de uso del suelo y vegetación de los mapas del INEGI se estimó un valor ponderado de  $w$ :

$$w = \frac{\sum_{i=1}^n w_i p_i}{\sum_{i=1}^n p_i} \tag{2}$$

donde  $p_i$  es el porcentaje de cobertura aérea de la subcuenca por la clase de uso del suelo y vegetación  $i$ .

Para estimar el valor del parámetro  $w$  en función de las clases de uso del suelo y vegetación (*sensu* INEGI), se analizaron las bases de datos de cuencas hidrográficas mundiales de Zhang *et al.* (1999 y 2001) y se ajustó  $w$  a las relaciones P-Q, Figura 3.

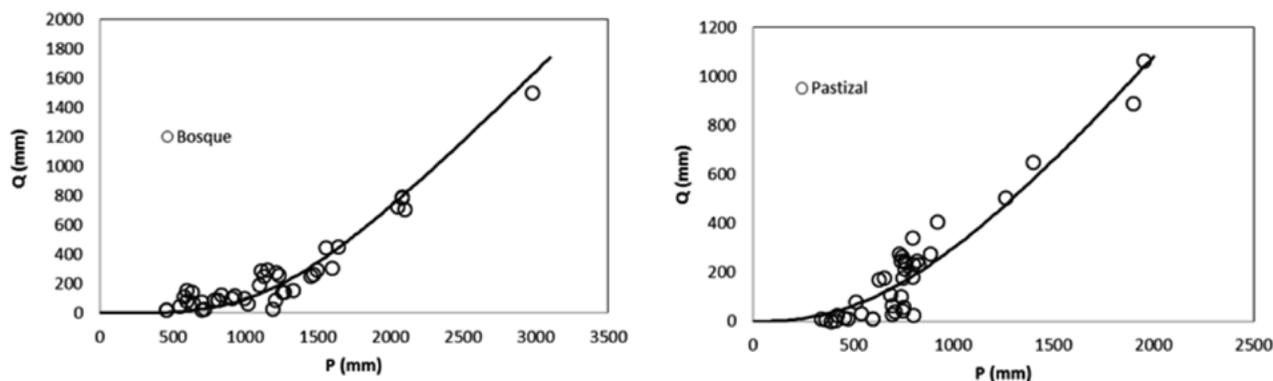


Figura 3. Ajuste del modelo de Fu a cuencas con vegetación dominada por bosque y pastizal.

En el Cuadro 1 se muestran los ajustes obtenidos en los ajustes del modelo de Fu, junto con su error (RECM = Raíz del Error Cuadrático Medio).

Cuadro 1. Parámetro  $w$  para diferentes usos del suelo en cuencas.

Uso del suelo	$w$	RECM
Bosque	3.76	77.3
Vegetación mixta (pastizal y bosque)	2.46	70.8
Pastizal y cultivo	2.93	59.7
Pastizal	2.42	77.4
Vegetación mixta (otra)	2.89	60.9

Los valores utilizados de  $w_i$  para las clases de uso del suelo y vegetación  $i$  definidas en las subcuencas (Salas-Aguilar y Paz-Pellat, 2018b) se observan en el Cuadro 2.

**Cuadro 2. Valor de  $w$  para las clases de uso del suelo y vegetación.**

Uso del Suelo y Vegetación	Parámetro $w$
Cuerpos de agua	2.1
Área agrícola	2.3
Sin vegetación	2.0
Bosque	4.0
Matorral	2.5
Pastizal	2.4
Selva húmeda	4.0
Selva seca	3.5
Vegetación hidrófila	3.5
Zona urbana	2.2

## RESULTADOS

Aunque la base de datos de subcuencas costeras que se muestra en la Figura 2 no es representativa de la escala nacional, se utilizó para realizar un proceso de regresión estadística multivariada para estimar

los volúmenes de agua (VEsc) y sedimentos (VSed), después de eliminar la subcuenca con identificador 24 150 que tiene un patrón anómalo (valor muy pequeño de gastos de sedimentos en relación al valor muy alto de gastos de agua) y corresponde a la subcuenca de mayor tamaño (21 520.32 km<sup>2</sup>), para obtener los modelos:

$$\ln(\text{VEsc}) = -33.5 + 0.893 \ln(A) + 3.89 \ln(P) + 1.097 (E_{To}/P) + 1.622 \ln(\text{Hrango}) - 0.275 \ln(w) \quad (3)$$

con  $R^2 = 0.881$  y error cuadrático e.e. = 0.397, donde VEsc está en miles de m<sup>3</sup>, A en km<sup>2</sup>, P en mm, ETo en mm, Hrango en m y  $w$  es adimensional.

$$\ln(\text{VSed}) = -39.22 + 0.832 \ln(A) + 3.953 \ln(P) + 1.921 (E_{To}/P) + 1.373 \ln(\text{Hrango}) - 0.368 \ln(w) \quad (4)$$

con  $R^2 = 0.618$  y error cuadrático e.e. = 0.717, donde VSed está en miles de m<sup>3</sup>.

Para el caso del uso de la base de datos nacional de subcuencas con sedimentos ( $n = 146$ ), los modelos obtenidos fueron:

$$\ln(\text{VEsc}) = -20.78 + 1.033 \ln(A) + 3.438 \ln(P) + 1.172 (E_{To}/P) + 0.22 \ln(\text{Hrango}) + 0.3209 \ln(w) \quad (5)$$

con  $R^2 = 0.872$  y error cuadrático e.e. = 0.682

$$\ln(\text{VSed}) = -26.91 + 0.776 \ln(A) + 2.968 \ln(P) + 2.422 (E_{To}/P) + 0.717 \ln(\text{Hrango}) - 0.218 \ln(w) \quad (6)$$

con  $R^2 = 0.642$  y error cuadrático e.e. = 1.008.

Los coeficientes de correlación y el error cuadrático presentados en los modelos corresponden a la escala logarítmica.

El uso del modelo de las subcuencas costeras produce subestimaciones marcadas en relación con el modelo de las subcuencas nacionales, con algunos casos de sobreestimaciones también marcadas.

Por representatividad nacional, se seleccionó el modelo de las subcuencas nacionales para generar una base de datos de estimaciones de volúmenes de agua y sedimentos de todas las subcuencas costeras, Figura 3.

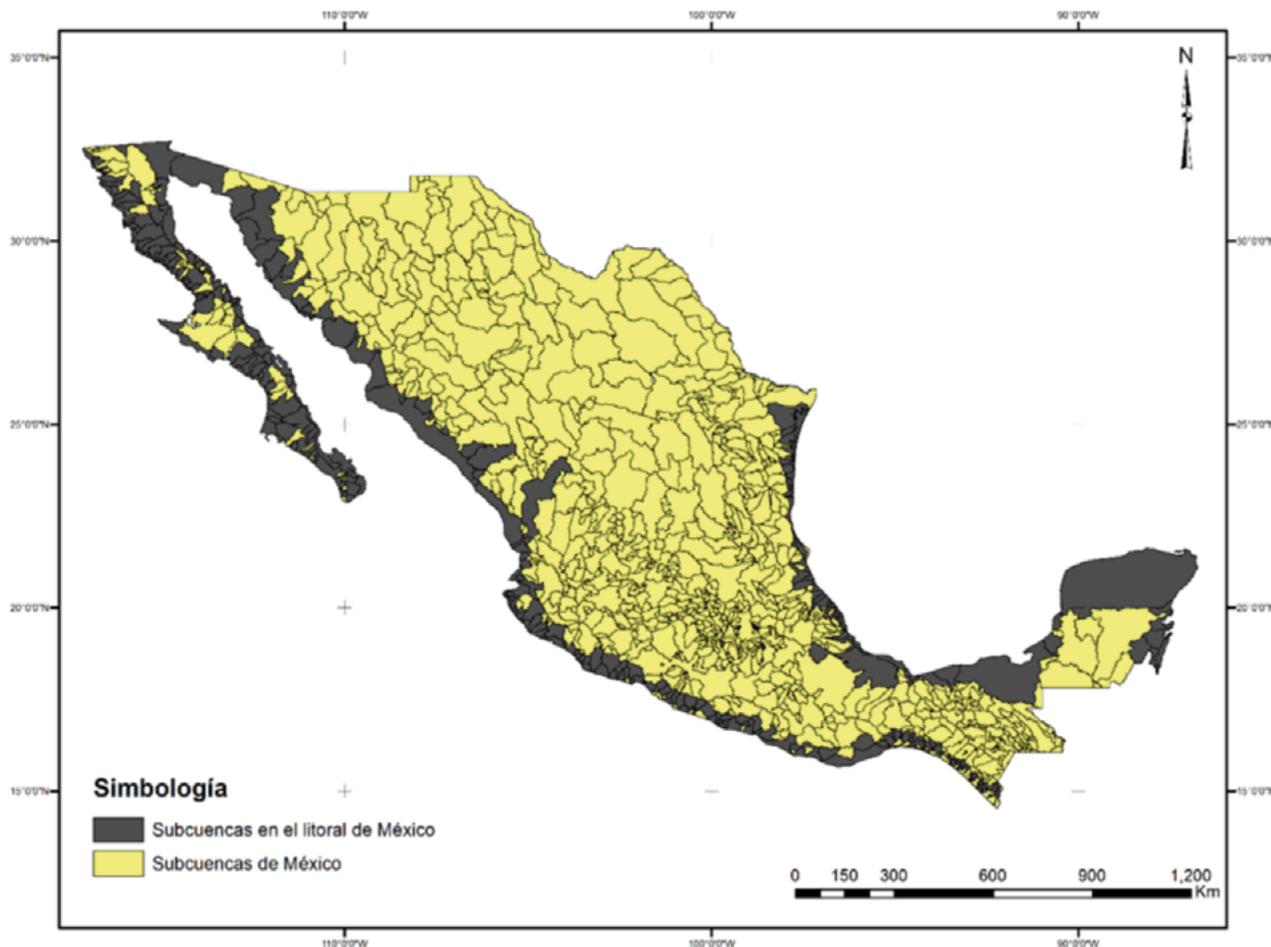


Figura 3. Subcuencas pertenecientes al litoral mexicano.

El Cuadro 3 muestra la estructura de la base de datos generada para todas las subcuencas costeras de México, para el promedio del período 2003-2012.

Cuadro 3. Estructura de la base de datos generada.

Campo	Descripción
Subcuenca	Identificador de la subcuenca
Nombre	Nombre de la subcuenca/río
Estado	Estado de la República
Area	Área de la subcuenca (km <sup>2</sup> )

Campo	Descripción
ETo	Evapotranspiración potencial (mm)
P	Precipitación (mm)
Hrango	Rango de alturas (Hmáx - Hmín) en la subcuenca, en m
W	Parámetro adimensional
VEsc	Volumen de escurrimiento en la subcuenca (miles m <sup>3</sup> )
VSed	Volumen de sedimento en la subcuenca (miles m <sup>3</sup> )

## DISCUSIÓN

La base de datos generada debe considerarse como una primera estimación de los volúmenes promedio de agua escurrida y descarga de sedimentos de las subcuencas costeras de México, para el período 2003-2012. En el caso de los volúmenes de agua el modelo desarrollado presentó una buena correlación, pero en el de sedimentos, la correlación es relativamente buena.

Es necesario convertir los datos de los volúmenes de sedimentos a masa (Mg) usando las densidades de los sedimentos, dato que no está disponible en la base de datos del BANDAS. A pesar de ello, es posible realizar una estimación del carbono orgánico total (COT) con la masa de los sedimentos, suponiendo un porcentaje de la masa del sedimento (*i.e.*  $\approx 2\%$ , Stallard, 1998; Lal, 2003 y 2006), que está en un intervalo de 1.6 a 6% (Meybeck, 1982).

Para mejorar la modelación de balances de flujos hacia el océano, es necesario considerar la integración de los ciclos biogeoquímicos e hidrológicos (Cole *et al.*, 2007; Aufdenkampe *et al.*, 2011; Ward *et al.*, 2017), para poder analizar los efectos de las perturbaciones antropogénicas (Aufdenkampe *et al.*, 2011; Regnier *et al.*, 2013).

Un aspecto importante a considerar en las estimaciones de los volúmenes de sedimento y agua es la regulación de las corrientes de agua por presas o vasos de almacenamientos aguas arriba de la localización de las estaciones hidrométricas, ya que alteran los patrones hidrológicos de las cuencas.

## CONCLUSIONES

Las estimaciones de los volúmenes de agua y sedimentos de las subcuencas costeras de México pueden considerarse como una primera aproximación

para realizar balances de masa de los flujos tierra-océano. Los modelos desarrollados se generaron en función de la información disponible, pero pueden mejorarse al incorporar nuevas variables.

Es necesario continuar con los esfuerzos de síntesis y modelación de los flujos laterales tierra-océano para poder realizar balances de los ciclos biogeoquímicos del país, así como para contribuir a los balances regionales y globales.

## BASE DE DATOS

En seguimiento a la política del Programa Mexicano del Carbono de libre acceso a las bases de datos asociadas al ciclo del carbono y sus interacciones, así como en soporte de las síntesis nacionales del ciclo del carbono en ecosistemas terrestres y acuáticos, la base de datos de este trabajo está disponible en [http://pmcarbono.org/pmc/bases\\_datos/](http://pmcarbono.org/pmc/bases_datos/).

## LITERATURA CITADA

- Alcocer, J. and F. Bernal-Brooks. 2010. Limnology in Mexico. *Hydrobiologia* 644:15-68.
- Anderson, H. W. 1954. Suspended sediment discharge as related to streamflow, topography, soil and land use. *Trans. AGU* 35:268-281.
- Aufdenkampe, A. K., E. Mayorga, P. A. Raymond, J. M. Melack, S. C. Doney, S. R. Alin, R. E. Aalto and K. Yoo. 2011. Riverine coupling of biogeochemical cycles between land, oceans, and atmosphere. *Coupled Biogeochemical Cycles* 9:53-60.
- Benke, A. C. 2009. Streams and rivers of North America: western, northern and Mexican basins. pp. 425-437. *In: Likens, G. E. (ed.) Encyclopedia of Inland Waters. Elsevier.*
- Beusen, A. H. W., A. L. M. Dekkers, A. F. Bouwman, W. Ludwig and J. Harrison. 2005. Estimating of global river transport of sediments and associated particulate C, N, and P. *Global Biogeochemical Cycles* DOI:10.1029/2005GB002453.

- Bolaños, M. A., F. Paz, C. O. Cruz, J. A. Argumedo, V. M. Romero y J. C. de la Cruz. 2016. Mapa de erosión de los suelos de México y posibles implicaciones en el almacenamiento de carbono orgánico del suelo. *Terra Latinoamericana* 34:271-288
- Budyko, M. I. 1974. *Climate and Life*. Academic Press, Orlando, Florida. 508 p.
- Campos-Aranda, D. F. 2012. Resultados de 35 batimetrías de la región centro-noreste de México, según el diagrama universal de sedimentación en embalses de Zhide Zhou. *Tecnología y Ciencia del Agua* 3:163-173.
- Chappell, A., J. Baldock and J. Sanderman. 2015. The global significance of omitting soil erosion from soil organic cycling schemes. *Nature Climate Change* DOI:10.1038/NCLIMATE2829.
- Chappell, A., N. P. Webb, H. Butler, C. Strong, G. H. McTainsch, J. F. Leys and R. Viscarra Rossel. 2013. Soil organic carbon dust emission: an omitted global source of atmospheric CO<sub>2</sub>. *Global Change Biol.* 19:3238-3244.
- Cole, J. J., Y. Prairie, N. Caraco, W. McDowell, L. Tranvik, R. Striegl, C. M. Duarte, P. Kortelainen, J. A. Downing, J. J. Middelburg and J. Melack. 2007. Plumbing the global carbon cycle: Integrating inland waters into the terrestrial carbon budget. *Ecosystems* 10:171-184.
- CONAGUA. 2013. Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales. Consulta de datos hidrométricos, de presas y sedimentos. Comisión Nacional del Agua, México. [www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/contenido/documentos/portada%20bandas.htm](http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/contenido/documentos/portada%20bandas.htm) (Consulta: 15 de septiembre de 2015).
- de la Peña, R., H. Hernández, G. J. Hernández, V. R. Islas y R. Terrés. 1990. La hidrometeorología en la Comisión Federal de Electricidad. *Ingeniería Hidráulica en México* Sep-Dic:31-42.
- Dedkov, A. P. and V. I. Mozzherin. 1996. Erosion and sediment yield on the Earth. pp. 29-33. *In: Walling, D. E. and B. W. Webb. Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives. Proceedings of the Exeter Symposium, July 1996. IAHS Publ. No. 236.*
- Drake, T. W., P. A. Raymond and R. G. M. Spencer. 2018. Terrestrial carbon inputs to inland waters: a current synthesis of estimates and uncertainty. *Limnology and Oceanography Letters* 3:132-142.
- Dunne, T. 1979. Sediment yield and land use in tropical catchments. *Journal of Hydrology* 42:281-300.
- Estrada-Gutiérrez, G., H. Silva-Hidalgo, M. L. Villalba, F. Astorga-Bustillos y B. Franco-Estrada. 2015. Tasa de acumulación de sedimentos en embalses del río Conchos, Chihuahua, México. 1er Congreso Iberoamericano sobre Sedimentos y Ecología. Querétaro, México 21-24 julio 2015. 8 p.
- Fu, B. P. 1981. On the calculation of the evaporation from land Surface. *Sci. Atmos. Sin.* 51:23-31.
- García-Aragón, J. A., E. Quentin, C. Díaz-Delgado and J. R. Hunt. 2007. Watershed level analysis of sediment filling in a Mexican highland reservoir. *Limnetica* 26:209-218.
- Hargreaves, G. H and Z. A. Samani. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied engineering in agriculture* 1:96-99.
- Hope, D., M. Billett and M. Cresser. 1994. A review of the export of carbon in river water: fluxes and processes. *Environmental Pollution* 84:301-324.
- Hudson, P., D. A. Hendrickson, A. C. Benke, A. Varela-Romero, R. Rodiles-Hernández and W. L. Minckley. 2005. Rivers of Mexico. pp. 171-182. *In: Benke, A. C. and C. E. Cushing (eds.). Rivers of North America. Elsevier Academic Press, San Diego, CA.*
- Jansen, I. M. L. and R. B. Painter. 1974. Predicting sediment yield from climate and topography. *Journal of Hydrology* 21:371-380.
- Jansson, M. B. 1988. A global survey of sediment yield. *Geografiska Annaler* 70:81-98.
- Lal, R. 1985. Soil erosion and sediment transport research to tropical Africa. *Hydrological Sciences Journal* 30:239-256.
- Lal, R. 1995. Global soil erosion by water and carbon dynamics. pp. 131-142. *In: Lal, R., J. Kimble, E. Levine and B. A. Stewart (eds.). Soil Management and Greenhouse Effect. CRC/Lewis. Boca Raton, FL, USA.*
- Lal, R. 2003. Soil erosion and the global carbon budget. *Environ. Int.* 29:437-450.
- Lal, R. 2006. Influence of soil erosion on carbon dynamics in the world. pp 23-35. *In: Roose, E. J., R. Lal, C. Feller, B. Barthes and B. A. Stewart (eds). Soil erosion and carbon dynamics. Adv Soil Sci CRC. Taylor & Francis, Boca Raton, Florida.*
- Langbein, W. B. and S. A. Schumm. 1958. Yield of sediment in relation to mean annual precipitation. *Trans. AGU* 39:1076-1084.
- Leopold, L. B., M. G. Wolman and J. P. Miller. 1964. *Fluvial Processes in Geomorphology*. Freeman, San Francisco, CA.
- Li, M., C. Peng, M. Wang, W. Xue, K. Zhang, K. Wang, G. Shiy and Q. Zhu. 2017. The carbon flux of global rivers: A re-evaluation of amount and spatial patterns. *Ecological Indicators* 80:40-51.
- Ludwig, W. and J. L. Probst. 1996. Predicting the oceanic input of organic carbon by continental erosion. *Global Biogeochemical Cycles* 10:23-41.
- Martínez-Méndez, R. López Martínez y E. Hernández Fuentes. 2001. Relación sedimentos – erosión en la cuenca alta del Papaloapan. XI Congreso nacional de Irrigación. Guanajuato, México 19-21/09/2001. 7 p.
- Meybeck, M. 1982. Carbon, nitrogen, and phosphorus transport by world rivers. *American Journal of Science* 282:401-450.
- Meybeck, M. 1993. Riverine transport of atmospheric carbon: sources, global typology and budget. *Water, Air, and Soil Pollution* 70:443-463.
- Milliman, J. D. and R. H. Meade. 1983. World-wide delivery of river sediment to the oceans. *The Journal of Geology* 91:1-21.

- Muñoz-Salinas, E. and M. Castillo. 2013. Sediment and water discharge assessment on Santiago and Pánuco rivers (central Mexico): the importance of topographic and climate factors. *Geografiska Annaler. Series A, Physical geography*. DOI:10.1111/geoa.12007.
- Muñoz-Salinas, E. and M. Castillo. 2015. Streamflow and sediment load assessment from 1950 to 2006 in the Usumacinta and Grijalva Rivers (Southern Mexico) and the influence of ENSO. *Catena* 127:270-278.
- Polyakov, V. O. and R. Lal. 2004. Soil erosion and carbon dynamics under simulated rainfall. *Soil Science* 169:590-599
- Pou-Alberú, S. y G. Pozos-Salazar. 1992. Cantidad de sedimento drenado hacia la costa del Pacífico en el Noroeste de Baja California, México. *Ciencias Marinas* 18:125-141.
- Ramírez-León, J. M. y J. Aparicio. 2009. Estimación de producción de sedimentos en cuencas. Aplicación al río Apulco, México. *Ingeniería Hidráulica en México*. 24:145-157.
- Regnier, P., P. Friedlingstein, P. Ciais, F. Mackenzie, N. Gruber, I. Janssens, G. Laurelle, R. Lauerwald, S. Luysaert, A. Andersson, S. Arndt, C. Arnosti, A. Borges, A. Dale, A. Gallego-Sala, Y. Goddérís, N. Goossens, J. Hartmann, C. Heinze, T. Ilyina, F. Joss, D. Larowe, J. Leifeld, F. Meysman, G. Munhoven, P. Raymond, R. Spahni, P. Suntharalingam and M. Thullner. 2013. Anthropogenic perturbation of the carbon fluxes from land to ocean. *Nature Geoscience* DOI: 10.1038/ngeo1830.
- Renard, K. G., G. R. Foster, G. A. Weesies and J. A. Porter. 1991. RUSLE: revised universal soil loss equation. *J. Soil Water Conserv.* 46:30-33.
- Salas-Aguilar, V. M. y F. Paz-Pellat. 2018a. Base de datos para la estimación de sedimentos en subcuencas de México. *Elementos para Políticas Públicas* 2:1-8.
- Salas-Aguilar, V. M. y F. Paz-Pellat. 2018b. Desarrollo de una base de datos climática nacional anual, 1989-2012: resolución 250 m. *Elementos para Políticas Públicas* 2:1-13.
- Schiettecatte, W., D. Gabriels, W. M. Cornelis and G. Hoffman. 2008. Enrichment of organic carbon in sediment transport by interrill and rill erosion processes. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 72:50-55.
- Schlesinger, W. H. and J. M. Melack. 1981. Transport of organic carbon in the world's rivers. *Tellus* 33:172-187.
- Smith, S. V., S. E. Ibarra-Obando, V. Díaz-Castañeda, F. J. Aranda-Manteca, J. D. Carriquiry, B. N. Popp and O. González-Yajimovich. 2008. Sediment organic carbon in Todos Santos Bay, Baja California, Mexico. *Estuaries and Coasts* 31:719-727.
- Smith, S. V., W. H. Renwick, R. B. Buddemeier and C. J. Crossland. 2001. Budgets of soil erosion and deposition for sediments and sedimentary organic carbon across the conterminous United States. *Global Biogeochemical Cycles* 15:697-707.
- Stallard, R. F. 1998. Terrestrial sedimentation and the carbon cycle: coupling weathering and erosion to carbon burial. *Global Biogeochemical Cycles* 12:231-257.
- Starr, G. C., R. Lal, R. Malone, D. Hothrm, L. Owens and J. Kimble. 2000. Modeling soil carbon transport by water erosion processes. *Land Degradation and Development* 11:83-91.
- Syvitski, J. P. M., S. D. Peckham, R. Hilberman and T. Mulder. 2003. Predicting the terrestrial flux of sediment to the global ocean: a planetary perspective. *Sedimentary Geology* 162:5-24.
- USDA-SCS. 1984. National Engineering Handbook. Section 3: Sedimentation. Chapter 6: Sediment sources, yields, and delivery ratios. pp. 6.1-6.14. *In: Soil Conservation Service and U.S. Dept. Agric. National Engineering Handbook.*
- Walling, D. E. 1983. The sediment delivery problem. *Journal of Hydrology* 65:209-237.
- Walling, D. E. and B. W. Webb. 1987. Material transport by the world's rivers: evolving perspectives. *Water for the Future: Hydrology in Perspective*. pp. 313-329. *In: Rodda, J. C. and N. C. Matalas (eds.). Proc. Rome Symp., April 1987. IAHS Publ. No. 164.*
- Walling, D. E. and B. W. Webb. 1996. Erosion and sediment yield: a global overview. pp. 3-19. *In: Walling, D. E. and B. W. Webb. Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives. Proc. Exeter Symp., July 1996. IAHS Publ. No. 236. Press, Wallingford, UK.*
- Ward, N. D., T. Bianchi, P. Medeiros, M. Seidel, J. Richey, R. Keil and H. Sawakuchi. 2017. Where carbon goes when water flows: carbon cycling across the aquatic continuum. *Frontiers in Marine Science* 4:1-27.
- Wischmeier, W. H. and D. D. Smith. 1978. Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. *USDA Handbook 537. U.S. Giv. Print. Off. Washington, D.C.* 57 p.
- Zhang, L., K. Hickel, W. R. Dawes, F. H. S. Chiew, A. W. Western and P. R. Briggs. 2004. A rational function approach for estimating mean annual evapotranspiration. *Water Resour. Res.* DOI:10.1029/2003WR002710.
- Zhang, L., W. R. Dawes and G. R. Walker. 1999. Predicting the effect of vegetation changes on catchment average water balance. *Technical Report 99/12. Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology. CSIRO Land and Water. Australia* 35 p.
- Zhang, L., W. R. Dawes and G. R. Walker. 2001. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale, *Water Resour. Res.* 37: 701-708.