

# DEGRADACIÓN DE SUELOS Y NECESIDAD DE POLÍTICAS PÚBLICAS

## SOIL DEGRADATION AND THE NEED FOR PUBLIC POLICIES

Jorge D. Etchevers<sup>1†</sup>, Claudia Hidalgo<sup>1</sup> y Fernando Paz<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratorio de Fertilidad y Química Ambiental, Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, km 36.5 Carretera México-Texcoco, Montecillo, Estado de México, 56230, México.

<sup>2</sup>GRENASER, Campus Montecillo, Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de México

<sup>†</sup>Autor para correspondencia: jetchev@colpos.mx.

### RESUMEN

La superficie de la Tierra que se cultiva es del orden del 11%, muy similar al porcentaje del territorio de México que se siembra anualmente. Si se consideran los pastizales dedicados a la ganadería, la superficie agropecuaria del país alcanza a 35% de su territorio. Esa área comprende los suelos que han dado de comer y deberán seguir haciéndolo a muchas generaciones venideras porque, por ahora, no hay otro planeta habitable, por ello hay que cuidarla. Desgraciadamente a ese medio de producción se le presta escasa atención pública. En contraste, agua, clima y biodiversidad están casi cotidianamente presentes en la atención de los habitantes del planeta. En México, así como en muchos países del mundo, urge el establecimiento de políticas públicas destinadas a evitar un deterioro del suelo mayor que el que ya se le ha infringido, particularmente en el último siglo, como consecuencia de no existir conciencia pública de su verdadero valor y de considerarlo un insumo casi inagotable. Las políticas y estrategias que se diseñen para su conservación, su mejoramiento y que continúe su degradación son de responsabilidad del Estado. Llama la atención que la importancia del suelo ha sido soslayada en los Objetivos del Desarrollo Sostenible, probablemente por una deficiencia propia de aquellos que lo estudiamos que hemos sido incapaces de transmitir a la sociedad el valor presente y futuro de este recurso natural. Postulamos que, por permanecer siempre en el mismo lugar, desde que nacemos hasta que morimos, hace que los seres humanos mostremos desinterés por el suelo y se le considere un recurso inacabable e inmanente. La presente reflexión aborda una de las varias funciones de cumple el suelo, la producción de alimentos y fibra, y urgimos a los gobiernos y a la sociedad entera a tomar conciencia para guardar su integridad, fundamental para la existencia de la vida en la Tierra.

**Palabras Clave:** *pérdida de suelo; estimaciones; estrategias para su conservación; funciones del suelo.*

### ABSTRACT

The surface of the cultivated Earth is 11%, very similar to the percentage of the territory of Mexico planted annually. If we consider pastures for livestock feeding, the agricultural area reaches 35% of its surface. This area includes the soils that have fed and should continue to feed many more generations. There is no other habitable planet, so we must take care of it. Unfortunately, the soils receive little public attention. In contrast, water, climate, and biodiversity are almost daily present in the attention of the planet's inhabitants. In Mexico, urges to establish public policies to prevent further soil deterioration than the actual one. Damage occurred mainly in the last century due to the lack of public awareness of its value; the soil is considered an almost inexhaustible input. The policies and strategies designed for its conservation, improvement, and continued degradation are the responsibility of the State. The Sustainable Development Goals overlook the importance of soil, probably due to a deficiency of those who studied it. We have been unable to transmit to society the present and future value of this natural resource. We postulate that because the soil remains in the same place since we are born until we die, human beings show disinterest, considering it an endless and immanent resource. The present reflection addresses one of the various functions of the soil: the production of food and fiber. We urge governments and society as a whole to become aware of its integrity, fundamental for the existence of life on Earth.

**Index words:** *loss of soil; estimations; strategies for its conservation; soil functions.*

## LOS SUELOS Y SU SUSTENTABILIDAD

Los suelos son la base de la agricultura y tienen múltiples funciones que generan beneficios al medio ambiente y las sociedades humanas, por ello, Schulte *et al.* (2015) recomiendan desarrollar un marco de toma de decisiones de políticas públicas para su conservación y mejoramiento. Aun cuando en México (SEMARNAT, 2010 y 2015) se han desarrollado diferentes estrategias y programas para el manejo sustentable de los suelos, su implementación no ha dado los resultados esperados. No obstante, algunos estudios han generado información diagnóstica del estado de los suelos en México (SEMARNAT-CP, 2002; CONAFOR-UACH, 2013), que permiten definir posibles hojas de ruta en la conservación de este recurso. Las estimaciones del estado que guardan los suelos de la nación, se han realizado con información de campo relativamente escasa. En los últimos años se han hecho algunos progresos, particularmente en lo referente a la sustentabilidad de los suelos. Por ejemplo, Paz-Pellat *et al.* (2019) revisaron las estimaciones de erosión en México, generalmente sólo hídrica, mismas que muestran diferencias entre sí. La estimación más reciente a escala nacional sobre este tópico es la de CGG-SAGARPA y COLPOS (2009), documentada en Bolaños *et al.* (2016) y usada como base por el INEGI para su producto de erosión, aunque con inconsistencias (INEGI, 2015a y b). En el tema de la degradación de los suelos, el estudio más actualizado es el realizado por SEMARNAT-CP (2002), el cual tiene una antigüedad de casi 20 años.

Para el aspecto asociado a la degradación, el estado que guarda el COS es la variable más adecuada para estimar las perturbaciones antropogénicas y naturales, de acuerdo con metodologías estandarizadas (IPCC, 2003 y 2006). FAO ha propuesto un programa de recarbonización de los suelos (FAO 2017a, b y c; 2018; 2020a y b) como un medio asociado al manejo sostenible del recurso, principalmente en suelos agropecuarios. Otras iniciativas, tal como la “4 por mil” (MAAF, 2015; Minasny *et al.*, 2017) o la denominada Agricultura Climáticamente Inteligente (FAO, 2013; Banco Mundial, CIAT, CATIE, 2014a, b y c; Paustian *et al.*, 2016), están orientadas al mismo objetivo que la iniciativa de la FAO. Con la implementación de buenas prácticas de manejo es posible analizar posibles incrementos en el COS (The World Bank, 2012a y b), permitiendo mejorar la fertilidad y la productividad agrícola, en esquemas “ganar-ganar”.

No obstante, debe tenerse cuidado en la interpretación de la información obtenida en meta análisis y entender el proceso evaluado (*e.g.* Post y Kwon, 2000; Aryal *et al.*, 2018), para generar conocimiento y entender las hipótesis implicadas en análisis clásicos (Paz-Pellat y Velázquez-Rodríguez, 2020).

La calidad o salud del suelo (Doran, 2002; Doran *et al.*, 1996) es un prerrequisito para la seguridad alimentaria sostenible (Vargas Rojas *et al.*, 2016), asociada al manejo de los suelos (McBratney *et al.*, 2014).

## MÉXICO Y LA DEGRADACIÓN DE LOS SUELOS

México se encuentra afectado por un grado preocupante de degradación de sus suelos (SEMARNAT-CP, 2002); sin embargo, las cifras reales de este fenómeno, generadas por varios estudios recientes, son discordantes (CGG-SAGARPA-COLPOS, 2009; CONAFOR-UACH, 2013). Según el primer documento, considerado el más confiable, el 44.9% del territorio nacional presentaba evidencias de degradación en 2002, mientras que en el 55.1% restante no se mostraban indicios de degradación aparente. Dicho estudio divide la degradación en procesos de carácter químico y físico y en erosión hídrica y eólica. Dentro de estos procesos, hay tipos específicos o niveles (ligero, moderado, fuerte y extremo) y causas de degradación. La degradación del suelo es preocupante por la importancia que tiene este recurso natural, un tanto olvidado por las instancias responsables de protegerlo y por la escasez de políticas públicas en México, para preservarlo. En la presente administración se prepara una estrategia nacional de protección de los suelos, particularmente, de los agrícolas, que se liga con la sustentabilidad de las prácticas agrícolas (SADER-ENASAS; documento interno de trabajo, no publicado).

La degradación física, química y biológica del suelo es consecuencia de procesos naturales y antrópicos. Si bien la degradación ocurre tanto en áreas productivas como no productivas, la principal inquietud de los autores de este trabajo, es la que ocurre en los suelos destinados a la producción agrícola. La degradación ocurre en todo tipo de condiciones del recurso suelo, independientemente de las características y ambiente donde se ubique; esto es, tipo, topografía o pendiente, cubierta vegetal, condiciones climáticas, entre otras. Los procesos naturales de degradación han ocurrido desde que se formó suelo sobre la superficie de la tierra

y no es de la atención de la presente reflexión.

La principal preocupación de los autores es la degradación antrópica, en especial, la generada en el siglo pasado y en las décadas recientes. La degradación antrópica se refiere a las interacciones de los procesos de intervención desarrollados por los seres humanos, tales como: deforestación, sobrepastoreo, uso de recursos naturales, riego, uso de agroquímicos, manejo inadecuado del suelo, sobreexplotación, cultivo en pendientes sin el manejo apropiado que requiere esta condición, etc. Tales intervenciones determinan una afectación de la calidad o salud del suelo. La degradación de ese recurso productivo ocurre como consecuencia del aprovechamiento que realizan los seres humanos con distintos objetivos. El principal objetivo de las intervenciones antrópicas, casi inevitable, es proveer de alimentos para los seres humanos y los animales, pero en décadas recientes a ese noble propósito se le ha unido el producir alimentos con fines de lucro y acumular capital. Dicha circunstancia se ha traducido en un agravante del problema, porque la intención inicial del proceso de producción, que durante siglos se realizó, probablemente de manera inconsciente, protegiendo al suelo, se ha desvirtuado. La agricultura, que se ha dado en llamar agricultura de capital o agricultura empresarial, introduce al sistema una gran cantidad de energía física y química y descuida la incorporación de materia orgánica. Este último tipo de agricultura no valora de la misma manera la importancia que tiene el mantenimiento de la calidad y la conservación del suelo como medio de producción de alimentos y materias primas, por lo que dichas actividades adquieren una importancia secundaria. La pérdida de la identidad de los dueños originarios de la tierra con este medio de producción de alimentos, probablemente sea consecuencia de la evolución de las formas de vida, que concentra las actividades en las ciudades, ha determinado que los terrenos agrícolas se renten o se vendan para construir viviendas. El significado de la degradación del suelo para un arrendatario, no tiene el mismo valor que para un agricultor activo y dueño de la tierra. La tierra para este último es su principal capital de producción, por lo que la degradación le importa, cosa que no ocurre con el arrendatario ya que su principal objetivo es la acumulación de riqueza.

En las últimas décadas se han realizado en México numerosos estudios sobre la degradación del suelo [INEGI (2015a y b), CONAFOR-UACH (2013), SEMARNAT (2010, 2015), CGG-SAGARPA y COLPOS. 2009)]. Los reportes más recientes de la lista

de referencias anterior datan de un periodo que va desde 2002 al 2015. Dichos estudios emplearon metodologías variadas y obtuvieron resultados que no son comparables entre sí. En México no se cuenta con un valor confiable de la magnitud de la degradación de los suelos, ni de la superficie afectada por este problema. A continuación, se cita textualmente el informe de SEMARNAT “El medioambiente de México 2003-2013” que a este respecto señala textualmente: “Ejemplos de esta divergencia son las recientes estimaciones publicadas en 2013 por la Comisión Nacional Forestal y la Universidad Autónoma Chapingo (CONAFOR-UACH. 2013) como parte del estudio para delimitar la Línea Base Nacional de Degradación de Tierras, que estima la superficie nacional afectada por erosión hídrica, eólica y degradación química y física en 61.7% del territorio”. En contraste, el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2015b) publicó los resultados preliminares del mapa de Erosión de Suelos en México escala 1:250 000, en el que muestra que cerca de 55% del territorio nacional está afectado por erosión hídrica y eólica. Cuando se comparan las cifras específicas para cada tipo de erosión, resulta que las diferencias son aún mayores comparadas con estimaciones previas sobre la materia.

SEMARNAT (SEMARNAT-CP, 2002) estima que el estudio *Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana, escala 1: 250 000* es el más confiable. Sin embargo, no se indica la razón que se tuvo para seleccionar tal preferencia. Siendo éste un informe oficial y buscando no crear confusión al respecto, se ha tomado como base para este trabajo. Según dicho documento, la degradación aparente del suelo en México, tanto química y física, como por erosión hídrica y eólica, alcanzaba en 2002, 44.9% del territorio nacional. La superficie afectada por degradación química (disminución de la fertilidad), la física (compactación), la hídrica y la eólica (erosión), ocupaban aproximadamente 34, 11, 23 y 18 millones de hectáreas, respectivamente.

Si en vez de considerar el tipo de erosión se analiza el grado de afectación de la degradación (ligero, moderado, fuerte y extremo) el estudio de SEMARNAT-Colegio de Postgraduados (SEMARNAT-CP, 2002), concluyó que los grados ligero y moderado en conjunto afectaban 42.8% de la superficie del país, mientras que el 2.1% se dividía entre los niveles fuerte y extremo. La opinión de los expertos nacionales en el tema indica que estas aproximaciones deben ser consideradas solo como tales, ya que como se señaló, estudios más

recientes muestran cifras divergentes. La falta de datos con sólido soporte científico, hacen que los tomadores de decisión no le hayan destinado mayor interés a elaborar políticas públicas encaminadas a crear programas efectivos para combatir este problema, que amenaza la seguridad alimentaria de las generaciones futuras.

## HACIA DONDE SE DEBEN ENCAMINARSE LOS ESFUERZOS

Los esfuerzos deben ir encaminados a generar tecnologías o aplicar las ya existentes para revertir las acciones que han degradado al suelo. Los suelos con mayor susceptibilidad a la degradación son los dedicados a las actividades agrícolas y pecuarias, mismas que constituyen aproximadamente 35% de las áreas afectadas y aquellas que han quedado desprotegidas por remoción de la cubierta vegetal (ca. 7%). Estos suelos son susceptibles de ser colonizados por especies vegetales herbáceas o arbóreas, siempre que la degradación no sea extrema, por ejemplo, erosión de cárcavas, suelos que han perdido el horizonte superficial. Esto lleva a concluir que deberían realizarse esfuerzos por investigar especies nativas que ya están adaptadas a las condiciones particulares de una zona ecológica de interés. Un ejemplo de ello lo constituye el trabajo realizado por la Universidad Autónoma de Tlaxcala (Martínez y Pérez *et al.*, 2011) que investigó la flora nativa de los *tepetates*, y esfuerzos aislados realizados en el norte del país por buscar resistencia en especies para desarrollarse en lugares secos o en suelos afectados por sales. Adicionalmente, no debería descartarse la posibilidad de introducir especies existentes en otras partes de México o del mundo. Una experiencia exitosa fue la desarrollada en el ex-lago de Texcoco donde la degradación química, por las condiciones de salinidad del suelo, hacían que prácticamente no hubiese cubierta vegetal, situación que generaban grandes cantidades de polvo en los asentamientos urbanos del entorno. Esta situación fue paliada por la introducción del pasto salado (*Distichlis spicata*), especie que se encuentra desde Canadá hasta el sur de América. Sin embargo, en términos generales, ha habido escaso esfuerzo dirigido a esta actividad. Una experiencia propia fue la introducción de una especie exótica a suelos volcánicos frágiles y susceptibles a la erosión, en la Sierra Purépecha de Michoacán. Seis variedades de *Trifolium subterraneum*, originario de

Nueva Zelanda, y usado extensamente en los suelos volcánicos de ese país y de Chile, fueron introducidos sin éxito. En las condiciones agroecológicas de esa zona se presentan fuertes heladas que provoca un descalce de las raíces al formarse columnas de hielo en la superficie de este suelo, que posee densidades aparentes muy bajas (entre 0.9 y 0.5 g cm<sup>-1</sup>). Esta especie se seleccionó porque es de autosiembra y una vez establecida no hay que volver a sembrarla. El *T. subterraneum* realiza un buen control de la erosión y fija nitrógeno en abundancia, a tal extremo que llega a intoxicarse. Dicha experiencia se trae a colación para llamar la atención acerca de la importancia de realizar pruebas preliminares antes de recomendar la introducción de especies exóticas al país.

La degradación de suelo por concepto de urbanización, actividades industriales, construcción de caminos, presas etc., pero fundamentalmente la primera, requiere de una política pública pronta y que no admita excepciones. La construcción de unidades habitacionales en suelo de aptitud agrícola constituye una seria amenaza para las generaciones futuras. Las experiencias de otros países, como Japón, que tienen pocas tierras laborables, muestran que las casas deben construirse en zonas sin aptitud agrícola. Ejemplos como esos deberían analizarse y seguirse, porque son de sentido común.

El hecho de concentrarse primeramente en los ecosistemas agrícolas no implica que se deban marginar a los ecosistemas naturales. En México se observan bosques templados afectados por erosión hídrica (21.5% de su superficie). En el norte del país donde ha habido escasa pluviometría en décadas pasadas y existen ambientes xerófitos y semidesérticos, el principal problema lo constituye la erosión eólica (28.5% de su superficie está degradada). Estas zonas del país requieren fundamentalmente enfoques de tipo biológico-agronómico-forestales para su protección. Algo similar ocurre en las áreas de pastizales naturales (25%) y matorral xerófilo (13.7%) que precisan de directrices para su recuperación, ya que han sido sobreexplotadas. Hay ejemplos concretos que muestran que es posible recuperar los pastizales de la zona semiárida, con adecuadas prácticas de manejo, como lo han demostrado agricultores ganaderos de Chihuahua, quienes informan que en épocas pasadas los bisontes bajaban desde Canadá y el Norte de Estados Unidos a pastar en esas regiones en época de nieve. El enfoque de instituciones creadas especialmente para contribuir al manejo de zonas

áridas, no ha redituado mayor beneficio para evitar el avance del desierto, privilegiando el equipamiento con tractores, créditos de avío, etc. Dicha situación debe ser enmendada prontamente para evitar alcanzar el punto de no retorno de la productividad del suelo.

En el extremo sur del país prevalece la degradación química que aqueja principalmente a las selvas húmedas y subhúmedas. Aproximadamente 40% de la este tipo de selvas se encuentra afectada por esta causa.

Un aspecto de carácter nacional y preocupante, es la pérdida de la fertilidad de los suelos dedicados a la agricultura, ganadería y bosques cultivados o agroecosistemas nativos (aproximadamente 70% del territorio nacional, esto es *ca.* 35 millones de hectáreas) donde existe evidencia sólida de degradación. La sobreexplotación y el empleo de manera no racional de fertilizantes, especialmente nitrogenados, que generan acidez residual, han permitido que se desarrollen extensas áreas afectadas por degradación debido a acidez excesiva del suelo. Esta acidez se observa claramente en los suelos dedicados a la producción de piña de Veracruz y Oaxaca, extensas zonas productoras de maíz del país (la Fraileasca en Chiapas, gran parte de Jalisco, la parte del valle de Toluca, entre muchas otras). En esas zonas deberían implementarse políticas que permitan a los productores acceder a programas de encalado del suelo y simultáneamente favorecer el sector de la industria productora de cal agrícola. La mayoría de la cal que se produce en México se destina a la industria de la construcción y es difícil acceder a cales agrícolas, especialmente de tipo dolomítica, particularmente en la región sur del país.

Adicionalmente al problema de la degradación química que causa la acidez, otro problema generalizado en los suelos del país, es la pérdida de materia orgánica, cuyo origen es la sobreexplotación y la erosión. Programas destinados a incrementar el contenido de materia orgánica del suelo requiere orientación, fundamentada en las experiencias existentes en el país, que se sostengan en evidencias que dichas prácticas están realmente generando incrementos de esa en el suelo. La nación se ha comprometido internacionalmente con ciertas iniciativas, como son la 20 x 20 (WRI, 2014 y 2018) y la 4 por 1000 (MAAF, 2015), pero desgraciadamente no se poseen resultados tangibles y pocas acciones destinadas a cumplir con lo comprometido. Los apoyos que se presten a los productores, como el pago

por servicios ambientales, deben sostenerse en dichas evidencias y no en aspectos administrativos como se realiza actualmente.

## COMENTARIOS FINALES

La degradación de los suelos en México ha tenido repercusiones significativas en la producción agrícola (erosión) (Contreras-Hinojosa *et al.*, 2005; Francisco-Nicolás *et al.*, 2005; Cotler *et al.*, 2011), que afectan la seguridad alimentaria y dañan el medio ambiente. Algunas prácticas agrícolas (Fuentes *et al.*, 2009; De León *et al.*, 2018) permiten revertir el proceso de degradación, por lo que deben ser consideradas para su promoción, particularmente en una perspectiva integral (socio-ambiental y productiva). En lo particular, la orientación hacia el manejo sostenible de la agricultura familiar (SAGARPA-FAO, 2012a) es una tarea pendiente, en especial ante el reto del cambio climático (SAGARPA-FAO, 2012b).

En este trabajo se reflexiona acerca de los peligros que acechan a la salud de los suelos de México, base de la agricultura y ganadería que provee los alimentos que se consumen en el país, sino no se adoptan las políticas públicas que impidan que se sigan degradando por un manejo poco profesional y descuidado, así como la necesidad de emprender acciones para mejorar su calidad. México se encuentra afectado por un grado preocupante de degradación de sus suelos, aunque las cifras actuales son discordantes y requieren que se haga una evaluación profunda de la verdadera dimensión del problema, empleando las técnicas modernas disponibles en el país. Se propone que los esfuerzos públicos y privados deben ir encaminados a generar tecnologías y aplicar las ya existentes, en aquellas actividades de degradación que son las de mayor importancia; esto es, suelos dedicados a las actividades agrícolas y pecuarias que constituyen aproximadamente 35% de las áreas afectadas y aquellas que han quedado sin protección de la cubierta vegetal por un manejo inadecuado.

Una actividad urgente de ejecutar en México es generar información actualizada, precisa y confiable, del estado de la degradación de los suelos, para fundamentar la implementación de políticas públicas encaminadas a la rehabilitación y conservación.

**LITERATURA CITADA**

- Aryal, D. R., D. E. Morales Ruiz, C. N. Tondopó Marroquín, R. Pinto Ruiz, F. Guevara Hernández, J. A. Venegas Venegas, A. Ponce Mendoza, G. Vallanueva López, F. Casanova Lugo, L. A. Rodríguez Larramendi, A. Ley de Coss, A. Hernández López, F. J. Medina Jonapá, C. A. Velázquez Sanabria, A. Alcudia Aguilar and I. Euán Chi. 2018. Soil organic carbon depletion from forests to grasslands conversion in Mexico: a review. *Agriculture* 8, 181
- Banco Mundial, CIAT, CATIE. 2014a. Agricultura climáticamente inteligente en México. Serie de perfiles de agricultura climáticamente inteligente para América Latina. Washington, D.C. 12 p.
- Banco Mundial, CIAT, CATIE. 2014b. Agricultura climáticamente inteligente en Chiapas, México. Serie de perfiles de agricultura climáticamente inteligente para América Latina. Washington, D.C. 12 p.
- Banco Mundial, CIAT, CATIE. 2014c. Agricultura climáticamente inteligente en Sinaloa, México. Serie de perfiles de agricultura climáticamente inteligente para América Latina. Washington, D.C. 12 p.
- 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.
- CGG-SAGARPA y COLPOS. 2009. Documento de referencia para la estimación de la erosión actual del suelo en México. Proyecto desarrollado por el Colegio de Postgraduados para la Coordinación General de Ganadería de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, bajo la Coordinación de Fernando Paz. México, D.F.: 46 p. Disponible en: [http://pmcarbono.org/pmc/bases\\_datos/index.php](http://pmcarbono.org/pmc/bases_datos/index.php)
- CONAFOR- UACH. 2013. Línea Base Nacional de Degradación de Tierras y Desertificación. Comisión Nacional Forestal y Universidad Autónoma Chapingo Informe Final. Jalisco, México. 107 p.
- Contreras-Hinojosa, J., V. Volke-Haller, J. Oropeza-Mota, C. Rodríguez-Franco, T. Martínez-Saldaña y A. Martínez-Garza. 2005. Reducción del rendimiento de maíz por la erosión del suelo en Yanhuitlán, Oaxaca, México. *Terra Latinoamericana* 23:399-4018
- Cotler, H., C.A. López and S. Martínez-Trinidad. 2011. ¿Cuánto nos cuesta la erosión de suelos? Aproximación a una valoración económica de la pérdida de suelos agrícolas en México. *Investigación Ambiental* 3:31-43
- De León-González, F., M. H. Fuentes-Ponde, A. Bautista-Cruz, T. Leyva-Pablo, H. Castillo-Juárez and L. M. Rodríguez-Sánchez. 2018. Cactus crop as an option to reduce soil C-CO<sub>2</sub> emissions in soils with declining fertility. *Agronomy for Sustainable Development* 38:8 doi:10.1007/s13593-017-0481-3
- Doran, J. W. 2002. Soil health and global sustainability: translating science into practice. *Agric. Ecosyst. Environ.* 88:119-127
- Doran, J. W., M. Sarrantonio and M.A. Liebig. 1996. Soil health and sustainability. *Advances in Agronomy* 46:1-54
- FAO. 2013. *Climate-Smart Agriculture Sourcebook*. Rome, Italy 570 p
- FAO. 2017a. *Voluntary guidelines for sustainable soil management*. Rome, Italy 26 p.
- FAO. 2017b. *Unlocking the potential of soil organic carbon, outcome document*. Global Symposium on Soil Organic Carbon, 21-23 march 2017. Rome, Italy 36 p.
- FAO. 2017c. *Soil organic carbon, the hidden potential*. Rome Italy 90 p.
- FAO. 2018. *Soil organic carbon mapping cookbook*, 2nd Edition. Rome, Italy 204 p.
- FAO. 2020a. *Food and Agriculture Organization of the United States*. Rome, Italy 33 p.
- FAO. 2020b. *A protocol for measurement, monitoring, reporting and verification of soil organic carbon in agricultural landscapes. – GSOC-MRV Protocol*. Rome, Italy doi:10.4060/cbo5gen 140 p.
- Francisco-Nicolás, N., A. Turrent-Fernández, J. L. Oropeza-Mota, M. R. Martínez-Menes y J. I. Cortés-Flores. 2005. Pérdida de suelo y relación erosión-productividad en cuatro sistemas de manejo del suelo. *Terra Latinoamericana* 24:253-260
- Fuentes, M., B. Govaerts, F. De León, C. Hidalgo, K. D. Sayre, J. Etchevers and L. Dendooven. 2009. Fourteen years of applying zero and conventional tillage, crop rotation and residue management systems and its effect on physical and chemical soil quality. *European Journal of Agronomy* 30: 228-237.
- INEGI. 2015a. *Estadísticas a propósito del día mundial del suelo (5 de diciembre): datos nacionales*. Aguascalientes, México, 2 de diciembre de 2015. Disponible en: <http://www.inegi.org.mx/saladeprensa/aproposito/2015/suelo0.pdf> (consulta abril 13 de 2016).
- INEGI. 2015b. *Conjunto de datos de erosión hídrica del suelo. Escala 1:250 000*. INEGI. Aguascalientes, México.
- IPCC. 2003. *Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry*. Edited by Jim Penman, Michael Gytarsky, Taka Hiraiishi, Thelma Krug, Dina Kruger, Riitta Pipatti, Leandro Buendia, Kyoko Miwa, Todd Ngara, Kiyoto Tanabe and Fabian Wagner. Published by the Institute for Global Environmental Strategies (IGES) for the IPCC. 590 p.

- IPCC. 2006. Agriculture, forestry and other land use IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Agriculture, forestry and other land use IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories olime 4 AFOLU. H.S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, and K. Tanabe (eds.). Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Institute for Global Environmental Strategies. Hayama, Japan.
- MAAF. 2015. The 4 0/00 initiative. Ministry of Agrifood and Forestry of France. 8 p.
- Martínez y Pérez, J. L., Santiago-Martínez, M. G., García Sastré, M., Nava Gutiérrez, Y., Águila Flores, V., Galindo Flores, G. L., Hernández-Cuevas, L. V. Guerra de la Cruz, V. 2011. Catálogo botánico ilustrado de tepetates en Tlaxcala. FOMIX-UAT. 181 p. ISBN: 978-607-7698-50-0
- McBratney, A., D. J. Field and A. Koch. 2014. The dimensions of soil security. *Geoderma* 213:203-213
- Minasny, B., B. P. Malone, A. B. McBratney, D. A. Angers, D. Arrouays, A. Chambers, V. Chaplot, Z. S. Chen, K. Cheng, B. S. Das, D. J. Field, A. Gimona, C. B. Hedley, S. Y. Hong, B. Mandal, B. P. Marchant, M. Martin, B. G. McConkey, V. L. Mulder, S. O'Rourke, A. C. Richer-de-Forges, I. Odeh, J. Padarian, K. Paustian, G. Pan, L. Poggio, I. Savin, V. Stolbovoy, U. Stockmann, Y. Sulaeman, C. C. Tsui, T. G. Vagen, B. van Wesemael and L. Winowiecki. 2017. Soil carbon 4 per mille. *Geoderma* 292:59-86.
- Paustian, K., J. Lehmann, S. Ogle, D. Reay, G. P. Robertson and P. Smith. 2016. Climate-smart soils. *Nature* 532: 49-57
- Paz-Pellat, F. y A. Velázquez-Rodríguez. 2020. Una nota de precaución para los meta análisis de la dinámica del carbono orgánico de los suelos. pp. 476-481. En: J. M. Hernández, M. Rojo, M. Fuentes, A. Velázquez y M. Bolaños (eds.). Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2020. Texcoco, Estado de México, México.
- Paz-Pellat, F., A. S. Velázquez-Rodríguez, J. D. Etchevers-Barra, C. I. Hidalgo-Moreno, M. Bolaños-González, B. de Jong, S. Covaleda-Ocón, M. Fuentes-Ponce, G. Vela-Correa, F. García-Oliva, Mario Guevara y R. Vargas. 2019. Capítulo 20: Suelos. pp. 436-468. En: F. Paz-Pellat, J. M. Hernández-Ayón, R. Sosa-Ávalos y A. S. Velázquez-Rodríguez. Estado del Ciclo del Carbono en México: Agenda Azul y Verde. Programa Mexicano del Carbono. Texcoco, Estado de México. ISBN 978-607-96490-7-4.
- Post, W. M. and K. C. Kwon. 2000. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential. *Global Change Biology* 6:317-328.
- SAGARPA-FAO. 2012a. Agricultura familiar con potencial productivo en México. SAGARPA/FAO. Ciudad de México, México. 191 p.
- SAGARPA-FAO. 2012b. México: el sector agropecuario ante el desafío del cambio climático. SAGARPA/FAO. Ciudad de México, México. 428 p.
- Schulte, R. P. O., F. Bampa, M. Bardy, C. Coyle, R. E. Creamer, R. Fealy, C. Gardi, B. B. Ghaley, P. Jordan, H. Laudon, C. O'Donochue, D. O'hUallachain, L. O'Sullivan, M. Rutgers, J. Six, G. L. Toth and D. Vrebos. 2015. Making the most of our land: managing soil functions from local to continental scale. *Frontiers in Environmental Sciences*. Doi:10.3389/fenvs.2015.00081
- SEMARNAT. 2010. Estrategia nacional de manejo sustentable de tierras. Ciudad de México, México. 116 p.
- SEMARNAT. 2015. Programa nacional manejo sustentable de tierras. Versión de trabajo. Ciudad de México, México. 66 p.
- SEMARNAT-CP. 2002. Evaluación de la degradación de los suelos causada por el hombre en la República Mexicana a escala 1:250,000. Memoria Nacional. D. F., México.
- The World Bank. 2012a. Carbon sequestration in agricultural soils. Economic and Sector Work. Report Number: 67395-GLB. Washington, D.C. 85 p.
- The World Bank. 2012b. Enhancing carbon stocks and reducing CO<sub>2</sub> emissions in agriculture and natural resources management projects. Toolkit. Washington, D.C. 115 p.
- Vargas Rojas, R., M. Achouri, J. Maroulis and L. Caon. 2016. Healthy soils: a prerequisite for sustainable food security. *Environ. Earth Sci.* 75:180 doi:10.1007/s12665-015-5099-7
- WRI. 2014. Mexico. Initiative 20x20. Disponible en: <https://initiative20x20.org/regions-countries/mexico>
- WRI- 2018. Initiative 20x20. Disponible en: <https://initiative20x20.org/publications/initiative-20x20-infographic>

