

Evaluación de la humedad y carbono edáfico en dos sistemas agrícolas

Soil moisture and carbon assessment in two agricultural systems

¹César Antonio Casasola-Elizondo , ²David Cristóbal-Acevedo 

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Campo Experimental Chetumal. Quintana Roo. ²Universidad Autónoma Chapingo (UACH). Departamento de Suelos. Texcoco, Estado de México. ³Autor de correspondencia: (casasola.cesar@inifap.gob.mx).

Resumen

Estudiar el efecto de la materia orgánica en los indicadores de humedad del suelo proporciona información sobre el impacto de las prácticas agrícolas en el ecosistema edáfico. El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de la incorporación de residuos de cosecha del cultivo de maíz sobre la capacidad de campo, el punto de marchitez permanente, la humedad aprovechable, la conductividad hidráulica saturada y el contenido de materia orgánica en el suelo de dos parcelas con distinto manejo agronómico: un sistema orgánico y un sistema convencional. La incorporación de residuos de cosecha en la parcela con manejo orgánico incrementó de manera significativa ($p < 0.05$) la capacidad de campo, humedad aprovechable, punto de marchitez permanente, la materia orgánica, y mostró un potencial de captura de carbono 36 % mayor en comparación con el sistema convencional.

Palabras clave: capacidad de campo, conductividad hidráulica, humedad aprovechable, punto de marchitez.

Abstract

Studying the effect of organic matter on soil moisture parameters provides information on the impact of agricultural practices on soil ecosystem. The objective of this research was to evaluate the effect of incorporating maize crop residues on field capacity, permanent wilting point, plant available water, saturated hydraulic conductivity, and organic matter content in the soil of two plots under different agricultural management systems:

an organic and a conventional system. The results indicate that the incorporation of crop residues in the organically managed plot significantly increased ($p < 0.05$) field capacity, plant available water, permanent wilting point, organic matter, and exhibited a 36 % higher carbon sequestration potential compared to the conventional system.

Index words: field capacity, hydraulic conductivity, plant available water, wilting point.

Introducción

El suelo es un sistema vivo, heterogéneo y dinámico debido a la interacción de sus componentes físicos, químicos y biológicos (Van, 2017). El agua y el suelo constituyen recursos naturales fundamentales para el crecimiento y rendimiento de los cultivos agrícolas, debido a que intervienen en procesos de disponibilidad y transporte de nutrientes esenciales (Taiz et al., 2015). El estudio de las propiedades físicas del suelo en relación con el aprovechamiento del agua aporta información valiosa sobre el impacto de las prácticas agrícolas, pecuarias y forestales en su funcionamiento (Estrada-Herrera et al., 2017).

Algunos indicadores importantes para evaluar el contenido de agua en los suelos son la capacidad de campo (CC), que corresponde a la cantidad de agua retenida a ~ -33 kPa; el punto de marchitez permanente (PMP), asociado al contenido de agua a ~ -1500 kPa (Inforsato & de Jong van Lier, 2021; Myeni et al., 2021); la humedad aprovechable (HA), definida como el agua disponible para los cultivos (Ladányi et al., 2021); y la conductividad hidráulica saturada (K_s), que

representa la capacidad del suelo para transmitir agua a través de los poros.

De acuerdo con datos de la Organización de las Naciones Unidas, para el año 2030 el sector agrícola deberá satisfacer la demanda alimentaria de una población proyectada en 500 millones de habitantes adicionales (FAOSTAT, 2025), al tiempo que prioriza técnicas orientadas a la recuperación de la fertilidad del recurso suelo, deteriorado tras décadas de agricultura intensiva.

Para revertir dicho deterioro y restaurar la fertilidad del suelo, se han implementado estrategias como el uso de cultivos de cobertura (Matos-Pech et al., 2022; Salcedo-Mayta et al., 2022), la labranza cero (Martínez et al., 2019), la rotación de cultivos (Weisberger et al., 2019) y la incorporación de materia orgánica con el fin de incrementar el contenido de carbono orgánico (Cooper et al., 2020). No obstante, el efecto positivo de estas prácticas es difícil de detectar antes de cinco años (Sequeira y Alley, 2011) debido a que se requiere entre 20 a 60 años para que el carbono orgánico se estabilice (West y Post, 2002). Por lo tanto, resulta pertinente complementar la comprensión sobre la interacción entre la incorporación de los residuos de cosecha, los indicadores de humedad del suelo y el contenido de carbono en sistemas agrícolas con distinto manejo. El objetivo de la presente investigación fue determinar el efecto de la incorporación de residuos de cosecha del cultivo de maíz en diversos indicadores de humedad del suelo, al comparar un sistema con manejo orgánico frente a uno con manejo convencional. Se planteó la hipótesis de que el tratamiento con el manejo orgánico retendrá mayor humedad en la capa agrícola (0 - 0.3 m), como resultado del incremento de la materia orgánica aportada por la adición de residuos de cosecha de ciclos anteriores.

Materiales y métodos

Área de estudio

La investigación se llevó a cabo sobre un suelo clasificado como Inceptisols (Soil Survey Staff, 2014), con textura franco arenosa (62.04 % arena, 20.72 % de limo y 17.24 % de arcilla), una

densidad aparente de 1.4 g cm⁻³, una profundidad de 1.2 m, pH 6.6, conductividad eléctrica (C.E.) 215 $\mu\text{S cm}^{-1}$ (Semarnat, 2002), pendiente de 2 %, a una altitud de 2250 m. El sitio reporta una precipitación media anual de 645 mm, una temperatura media anual de 15 °C, presencia de heladas tempranas a fines de septiembre y tardías en abril (García, 2004).

Las muestras de suelo se recolectaron en unidades experimentales establecidas hace más de 10 años. La parcela con manejo orgánico, tiene un área de 3150 m², se incorporó en promedio 8 Mg ha⁻¹ año⁻¹ de residuos de cosecha (hoja y tallos de maíz), sin aplicación de fertilizantes minerales. En contraste, la parcela con manejo convencional, posee un área de 1375 m², utilizó un sistema de labranza tradicional (barbecho, rastra, surcado y siembra) y se cultivó durante 10 ciclos con monocultivo de maíz. Se aplicó fertilización mineral a una dosis de 200-100-60 (kg ha⁻¹ de N - P₂O₅ - K₂O). El 50 % del requerimiento de nitrógeno y el 100 % del fósforo y potasio se adicionó al momento de la siembra; el 50 % restante de nitrógeno se incorporó al final del desarrollo vegetativo (75 días después de la siembra). Como fuente mineral se utilizó sulfato de amonio (21 % N), superfosfato simple (18 % P₂O₅) y sulfato de potasio (50 % K₂O).

Muestreo y análisis de suelos

Se empleó un muestreo sistemático en cuadrícula con una separación equidistante de 5 m entre puntos de muestreo a una profundidad de 0 - 0.3 m, se obtuvieron un total de 214 muestras de suelos (152 del sistema orgánico y 62 del sistema convencional). Las muestras se secaron a temperatura ambiente, sobre papel periódico con volteos constantes y sin exposición directa al sol. Con un mazo de madera se redujo el tamaño de los agregados y se tamizó por una malla número 10 (2 mm por pulgada lineal) como lo indica el método AS-01 de la NOM-021-RECNAT-2000 (Semarnat, 2002).

Se realizó el registro de indicadores de humedad de suelo a distintos potenciales hídricos, capacidad de campo (CC; agua retenida a - 33 kPa) con la olla de presión, y el punto de marchitez

permanente (*PMP*; agua retenida a – 1500 kPa) con la membrana de presión (Richards, 1956) y la humedad aprovechable (*HA*; calculada como la diferencia entre *CC* y *PMP*) a través del método AS-06 (Semarnat, 2002). La conductividad hidráulica saturada (K_s ; cm h^{-1}) se realizó con el permeámetro de carga constante en muestras saturadas (Elrick y Reynolds, 1992).

El contenido de materia orgánica (*MO*; %) del suelo se determinó por el método AS-07 (Semarnat, 2002), y el carbono orgánico total (*CO*; %) se calculó al dividir el valor de *MO* entre el factor de Van Benmelen (1.724) (Ecuación 1), que resulta de la suposición de que la materia orgánica del suelo contiene un 58 % de carbono ($1/0.58 = 1.724$), (*Ibid.*).

$$CO(\%) = \frac{MO(\%)}{1.724} \quad \text{Ecuación 1}$$

El carbono orgánico del suelo (*COS*; Mg ha^{-1}) se estimó con base en el *CO*, la densidad aparente del suelo (P_s ; Mg m^{-3}) y la profundidad de muestreo (P_s ; m) (Ecuación 2), mediante la metodología de Batjes (1996):

$$COS = CO \times P_a \times P_s \quad \text{Ecuación 2}$$

Diseño experimental y análisis estadístico

Se realizó un diseño experimental completamente al azar (DCA). Las variables seleccionadas se analizaron mediante un análisis de varianza (ANOVA) bajo un modelo lineal generalizado univariado, donde los resultados con $p < 0.05$ se consideran significativos. Este procedimiento se ejecutó con el software SAS OnDemand for

Academics (SAS Institute Inc., 2024). Asimismo, el análisis de componentes principales (*PCA*) se realizó a partir de la matriz de correlación de Pearson de las variables estandarizadas con la librería FactoMineR del software Rstudio v.I.2.I335 (RStudio Team, 2020). La contribución relativa de cada variable se determinó con base en los eigenvalores. Por último, la representación cartográfica del área de estudio se elaboró con el software GS+ (Robertson, 2008).

Resultados y discusión

Después de 10 años de incorporación continua de residuos de cosecha, el sistema agrícola orgánico presentó un mayor contenido de agua del suelo en comparación con el sistema convencional. A una profundidad de 0.30 m, la capacidad de campo alcanzó ($0.217 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), valor superior al registrado en el sistema convencional ($0.189 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). De manera similar, el punto de marchitez permanente fue mayor en el sistema orgánico ($0.094 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) en comparación al sistema convencional ($0.082 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). Ambas variables presentaron diferencias significativas ($p < 0.0001$), resultados que coinciden con los registrados por Lal (2020), quien señala que restaurar el contenido de materia orgánica de suelos degradados incrementa en mayor medida la retención de agua a capacidad de campo que el aumento en el punto de marchitez permanente (**Tabla I**).

Tabla I. Indicadores de humedad y contenido de materia orgánica del suelo.

Sistema agrícola	<i>CC</i> ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)	<i>PMP</i> ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)	<i>HA</i> ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)	K_s (cm h^{-1})	<i>MO</i> (%)
Sistema orgánico	0.217 ± 0.012^a	0.094 ± 0.004^a	0.124 ± 0.012^a	2.9 ± 1.1^a	1.6 ± 0.8^a
Sistema convencional	0.189 ± 0.010^b	0.082 ± 0.004^b	0.107 ± 0.008^b	2.8 ± 0.8^a	1.3 ± 0.4^b
Valor F modelo	33.08	50.85	13.13	0.09	5.98
Pr > F modelo	<0.0001	<0.0001	0.0005	0.7708	0.0167
DMS	0.97	0.33	0.89	0.82	0.29

CC = capacidad de campo, *PMP* = punto de marchitez permanente, *HA* = humedad aprovechable, K_s = conductividad hidráulica saturada, *MO* = materia orgánica, DMS = diferencia mínima significativa. Medias con letras distintas en hileras presentan diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$). $n = 40$. Media \pm desviación estándar.

La humedad aprovechable fue mayor en el sistema orgánico ($0.124 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) respecto al sistema convencional ($0.107 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) ($p \leq 0.0005$). Este resultado sugiere una mayor capacidad del suelo para almacenar y suministrar agua a los cultivos bajo prácticas de manejo que incorporan de manera continua de residuos orgánicos de cultivos. Estos hallazgos coinciden con lo reportado por Salcedo-Pérez et al. (2007), quienes señalaron que la humedad aprovechable depende del tipo de suelo y puede modificarse mediante las prácticas agrícolas que influyen en sus propiedades físicas. Asimismo, Sarker et al. (2022) reportaron que la incorporación de residuos de cosecha aumenta el contenido de humedad del suelo en distintas profundidades en comparación con parcelas sin residuos, debido a que estos modifican el balance de energía del suelo, reducen la evaporación y contribuyen a mantener condiciones más favorables de temperatura y disponibilidad hídrica (Tabla I).

La conductividad hidráulica saturada no mostró diferencias entre tratamientos ($p > 0.05$), lo que indica que los cambios atribuibles al manejo agrícola no afectaron las propiedades relacionadas con la transmisión de agua en condiciones de saturación (Tabla I). Este resultado contrasta con lo reportado por Lugo et al. (2022) quienes señalaron que la incorporación de mejoradores orgánicos promovió modificaciones de 7 % en la porosidad del suelo y de 5 % en la conductividad hidráulica respecto al tratamiento testigo.

Asimismo, el contenido de materia orgánica fue significativa en el sistema orgánico 1.6 % respecto al sistema convencional 1.3 % ($p < 0.05$). De acuerdo con los criterios establecidos por Semarnat (2002), el sistema orgánico se clasifica con un contenido medio (1.6 – 3.5 % de MO), mientras que el sistema convencional se ubica en la categoría de contenido bajo (0.6 – 1.5% de MO) (Tabla I).

En este sentido, Flores-López et al. (2014) documentaron que la incorporación de residuos de cosecha en el sistema de producción de maíz contribuye a mantener o incrementar los niveles de materia orgánica del suelo hasta 4.6 % con dos pasos de rastra, en contraste con prácticas donde el rastrojo se retira o quema.

La Figura I muestra un agrupamiento consistente de las observaciones hacia el sistema agrícola orgánico, el cual se asocia a niveles más elevados de capacidad de campo, humedad aprovechable y punto de marchitez permanente. Este patrón indica que la incorporación de residuos de cosecha de cultivo de ciclos anteriores promueve una mayor retención de agua en el suelo, en comparación con el sistema convencional donde las observaciones se concentran en una región del plano asociada a menores valores de los indicadores de humedad lo que sugiere una menor capacidad del suelo para almacenar agua aprovechable por los cultivos.

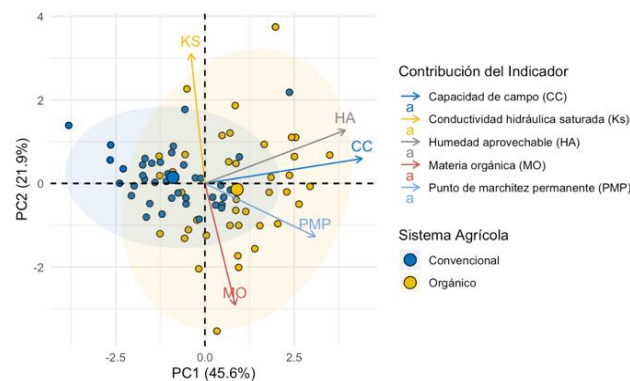


Figura I. Análisis de coeficientes de correlación de Pearson entre indicadores de humedad y contenido de materia orgánica del suelo. CC = capacidad de campo, PMP = punto de marchitez permanente, HA = humedad aprovechable, Ks = conductividad hidráulica saturada, MO = materia orgánica.

Tabla 2. Contribución de la varianza total en indicadores de humedad y contenido de materia orgánica del suelo.

Componente	Eigenvalor	Varianza (%)	Varianza acumulada (%)
PCI CC	2.27	0.46	0.46
PC2 HA	1.09	0.22	0.68
PC3 PMP	0.94 ⁻¹	0.19	0.87
PC4 K _s	0.68 ⁻¹	0.12	0.99
PC5 MO	0.01 ⁻¹	0.01	1.00

CC = capacidad de campo, PMP = punto de marchitez permanente, HA = humedad aprovechable, K_s = conductividad hidráulica saturada, MO = materia orgánica.

Estos resultados concuerdan con lo reportado por Ramírez et al. (2023), quienes demostraron que el incremento del carbono orgánico del suelo mejora de manera significativa la retención de agua disponible, de manera particular en el rango comprendido entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente, debido a cambios en la distribución y conectividad de poros. De manera similar, otros trabajos señalan que sistemas con mayor incorporación de materia orgánica presentan mejor retención de nutrientes, estabilidad de agregados, mayor porosidad estructural y, en consecuencia, mayor almacenamiento hídrico en el perfil del suelo (de Alencar et al., 2024; Abdallah et al., 2021; Lal, 2014).

Bautista-Cruz et al. (2004) consideran a la materia orgánica, la conductividad hidráulica saturada y la capacidad de almacenamiento del agua como indicadores químicos y físicos de la calidad de un suelo, debido a que influyen en la manera en que el recurso acepta, retiene y transmite agua con nutrimentos a las plantas y microorganismos información que coincide con la reportada en el presente trabajo (Tabla 2).

En la Figura 2 se observa una correlación positiva y significativa de manera estadística entre la capacidad de campo con la humedad aprovechable y el punto de marchitez permanente, lo que indica que los incrementos en la retención de agua del suelo ocurren de manera proporcional entre las variables estudiadas. Este comportamiento sugiere que la dinámica hídrica del suelo está influida por modificaciones

estructurales asociados al contenido de materia orgánica, de manera particular en la distribución y estabilidad del sistema poroso.

Estos resultados coinciden con lo reportado por Abdallah et al. (2021) quienes encontraron relaciones positivas entre el incremento de materia orgánica y la mejora simultánea de la capacidad de campo y del agua disponible, efecto atribuido a una mayor estabilidad de agregados y a modificaciones en la distribución y continuidad de macroporos y mesoporos. Por otro lado, Lal (2020) menciona que, aunque las propiedades físicas, químicas y biológicas pueden emplearse como indicadores de calidad de suelo, su interpretación debe realizarse considerando el contexto edafoclimático, el uso de suelo, ya que no todos los atributos responden de igual modo ante distintas prácticas de manejo.

En la Figura 3 se observa que el potencial de captura de los suelos agrícolas está asociado con mejores prácticas de manejo. La incorporación de residuos de cosecha durante 10 años en el sistema orgánico Figura (3A) logró almacenar 4'578 MgC ha⁻¹ en los primeros 0.3 m de profundidad, lo que representa un incremento de 30 % más carbono respecto al sistema convencional Figura (3B), información que coincide con la reportada por Sánchez-Hernández et al. (2011) quienes mencionan que el aporte de residuos orgánicos característicos del sistema de uso agrícola y el tipo de suelo regulan la acumulación de carbono en el suelo. Este comportamiento también coincide con lo descrito por Lal (2018), quien señala que la incorporación continua de residuos de cosecha

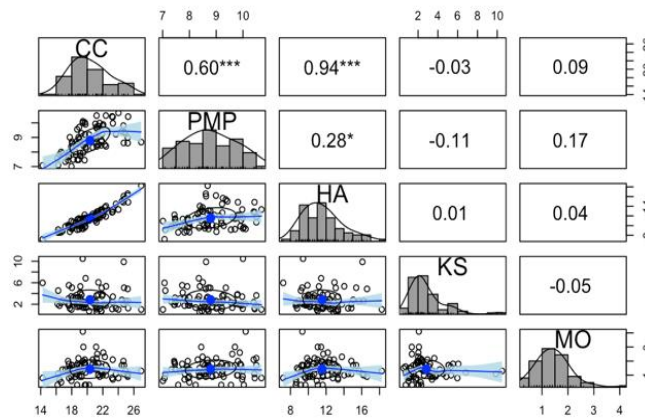


Figura 2. Análisis de coeficientes de correlación de Pearson entre indicadores de humedad y contenido de materia orgánica del suelo. *CC* = capacidad de campo, *PMP* = punto de marchitez permanente, *HA* = humedad aprovechable, *Ks* = conductividad hidráulica saturada, *MO* = materia orgánica. ***, **, * significativo (0.001, 0.01 y 0.05).

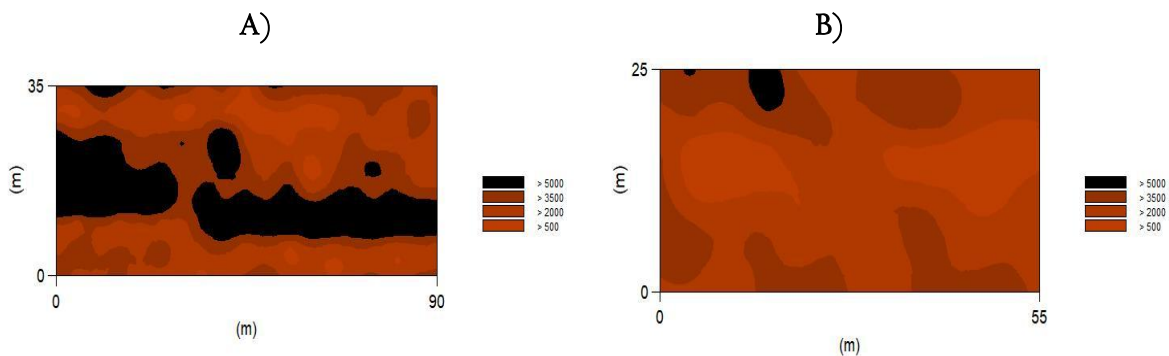


Figura 3. Distribución del carbono orgánico del suelo (MgC ha^{-1}) en dos sistemas de producción agrícola. A = sistema orgánico, B = sistema convencional. Rango de 500 a 1999 MgC ha^{-1} , 2000 a 3499 MgC ha^{-1} , 3500 a 4999 MgC ha^{-1} , >5000 MgC ha^{-1} .

constituye una de las prácticas más efectivas para incrementar el secuestro de carbono en horizontes superficiales del suelo. Asimismo, la acumulación observada puede explicarse por mecanismos de estabilización física del carbono dentro de agregados, tal como lo documentaron Six et al. (2004), quienes demostraron que la formación y estabilización de macro y microagregados favorecen la protección del carbono orgánico frente a la mineralización rápida, favoreciendo su permanencia en el suelo sin impedir la dinámica de

la fracción lábil necesaria para los procesos biogeoquímicos y la nutrición de los cultivos.

Además del incremento en el almacenamiento de carbono, la incorporación de residuos de cosecha de ciclos anteriores contribuye a mejorar la calidad del suelo y sus propiedades físicas y químicas (Smreczak y Ukalska-Jaruga, 2021). De manera similar, Tang et al. (2024) encontraron que incorporar residuos de maíz durante cinco años incrementó la concentración de carbono orgánico del suelo y el almacenamiento de nitrógeno total en la capa superior del suelo,

asociado con mejoras en la estructura y estabilidad de agregación.

Conclusiones

Después de 10 años de incorporación continua de residuos de cosecha, el sistema agrícola orgánico presentó mayor almacenamiento de carbono en los primeros 0.30 m del suelo y mejor capacidad de retención de agua, evidenciada por mayores valores de capacidad de campo, punto de marchitez permanente, humedad aprovechable y contenido de materia orgánica respecto al manejo convencional, sin afectar la conductividad hidráulica saturada. Estos resultados demuestran que la incorporación de residuos constituye una práctica efectiva para incrementar la calidad hídrica del suelo y contribuir a la sostenibilidad del sistema agrícola.

Agradecimientos

Al Centro de Investigación Regional Sureste del Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas Forestales y Pecuarias, así como a la Universidad Autónoma Chapingo por la colaboración y el apoyo en la documentación de la presente investigación.

Referencias

- Abdallah, A. M., Jat, H. S., Choudhary, M., Abdelaty, E. F., Sharma, P. C. & Jat, M. L. (2021). Conservation agriculture effects on soil water holding capacity and water-saving varied with management practices and agroecological conditions: A review. *Agronomy*, 11(9), 1681. <https://doi.org/10.3390/agronomy11091681>
- Batjes, N. H. (1996). Total carbon and nitrogen in soils of the world. *European journal of soil science*, 47(2), 151-163. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1996.tb01386.x>
- Bautista-Cruz, A., Etchevers-Barra, J., del Castillo, R. F. & Gutiérrez, C. (2004). La calidad del suelo y sus indicadores. *Ecosistemas*, 13(2), 90-97.
- Cooper, J., Greenberg, I., Ludwig, B., Hippich, L., Fischer, D., Glaser, B. & Kaiser, M. (2020). Effect of biochar and compost on soil properties and organic matter in aggregate size fractions under field conditions. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 295, 106882. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.106882>
- de Alencar, G. V., Gomes, L. C., Barros, V. M. D. S., Ortiz Escobar, M. E., de Oliveira, T. S. & Mendonca, E. D. S. (2024). Organic farming improves soil carbon pools and aggregation of sandy soils in the Brazilian semi-arid region. *Soil Use and Management*, 40(3), e13097. <https://doi.org/10.1111/sum.13097>
- Elrick, D. E. & Reynolds, W. D. (1992). *Infiltration from Constant-Head Well Permeameters and Infiltrimeters. In: Advances in measurement of soil physical properties: bringing theory into practice.* (G. C. Madison Topp, W. D. Reynolds, & R. E. Green, Eds.). Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2136/sssaspepub30.c1>
- Estrada-Herrera, I. R., Hidalgo-Moreno, C., Guzmán-Plazola, R., Almaraz Suárez, J. J., Navarro-Garza, H. & Etchevers-Barra, J. D. (2017). Indicadores de calidad de suelo para evaluar su fertilidad. *Agrociencia*, 51(8), 813-831. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=SI405-31952017000800813&lng=es&nrm=iso&tln_g=es
- FAOSTAT. (2025). *Food and Agriculture Organization of the United Nations.* FAOSTAT Database. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>
- Flores-López, H. E., Ruíz Corral, J. A., Mora Orozco, C. D. L., Zarazúa-Villaseñor, P., Chávez Durán, Á. A., Ramírez Vega, H. & Velásquez Valle, M. A. (2014). Aplicación del modelo EPIC para evaluar el efecto del cambio climático y prácticas de manejo sobre el rendimiento de grano en maíz de

- temporal. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(SPE10), 2007-2020.
- García, E. (2002). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Inforsato, L. & de Jong van Lier, Q. (2021). Polynomial functions to predict flux-based field capacity from soil hydraulic parameters. *Geoderma*, 404. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115308>
- Ladányi, Z., Barta, K., Blanka, V. & Pálffy, B. (2021). Assessing Available Water Content of Sandy Soils to Support Drought Monitoring and Agricultural Water Management. *Water Resources Management*, 35(3), 869-880. <https://doi.org/10.1007/s11269-020-02747-6>
- Lal, R. (2014). Soil conservation and ecosystem services. *International Soil and Water Conservation Research*, 2(3), 36-47. [https://doi.org/10.1016/S2095-6339\(15\)30021-6](https://doi.org/10.1016/S2095-6339(15)30021-6)
- Lal, R. (2018). Digging deeper: A holistic perspective of factors affecting soil organic carbon sequestration in agroecosystems. *Global change biology*, 24(8), 3285-3301. <https://doi.org/10.1111/gcb.14054>
- Lal, R. (2020). Soil organic matter and water retention. *Agronomy Journal*, 112(5), 3265-3277. <https://doi.org/10.1002/agj2.20282>
- Lugo Valenzuela, H., Prado Hernandez, J. V., Vazquez Peña, M. A., Pineda Pineda, J. & Velazquez Lopez, N. (2022). Caracterización hidrodinámica del modelo de Green y Ampt en un suelo con mejoradores orgánicos. *Biotecnía*, 24(3), 15-21. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v24i3.1627>
- Martínez Gamiño, M. Á., Osuna Ceja, E. S. & Espinosa Ramírez, M. (2019). Impacto acumulado de la agricultura de conservación en propiedades del suelo y rendimiento de maíz. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(4), 765-778. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i4.1640>
- Matos-Pech, G., Arcocha-Gómez, E., López-Hernández, M. B., Garma-Quen, P., González-Valdivia, N. A. & Echavarría-Góngora, E. de J. (2022). Efecto de abonos verdes inoculados en las propiedades químicas de un luvisol férrico de Campeche, México. *Revista Terra Latinoamericana*, 40, 1-9. e933. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.933>
- Miyeni, L., Mdlambuzi, T., Paterson, D. G., Nysschen, G. De. & Moeletsi, M. E. (2021). Development and evaluation of pedotransfer functions to estimate soil moisture content at field capacity and permanent wilting point for South African soils. *Water (Switzerland)*, 13(19), 2639. <https://doi.org/10.3390/w13192639>
- Ramírez, P. B., Machado, S., Singh, S., Plunkett, R. & Calderón, F. J. (2023). Addressing the effects of soil organic carbon on water retention in US Pacific Northwest wheat-soil systems. *Frontiers in Soil Science*, 3, 1233886. <https://doi.org/10.3389/fsoil.2023.1233886>
- Richards, L. A. (1956). Sample Retainers for Measuring Water Retention by Soil. *Soil Science Society of America Journal*, 20(3), 301-303. <https://doi.org/10.2136/sssaj1956.03615995002000030001x>
- Robertson, G. P. (2008). *GS+: Geostatistics for the Environmental Sciences*. GammaDesign Software.
- RStudio Team. (2020). *RStudio: Integrated Development for R*. <http://www.rstudio.com/>
- Sarker, M.R., Galdos, M.V., Challinor, A.J., Huda, M.S., Chaki, A.K. and Hossain, A. (2022). Conservation tillage and residue management improve soil health and crop productivity—Evidence from a rice-maize cropping system in Bangladesh. *Front. Environ. Sci.* 10:969819. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.969819>
- Salcedo-Mayta, S., Canihua-Rojas, J., Samaniego-Vivanco, T., Cruz-Luis, J., Pérez-Porras, W. & Cosme De La Cruz, R. C. (2022). Cover crops

- associated with quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) in the Peruvian Altiplano: Erosion reduction, improved soil health and agricultural yield. *Scientia Agropecuaria*, 13(3), 265–274. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2022.024>
- Salcedo-Pérez, E., Galvis-Spinola, A., Hernández-Mendoza, T. M., Rodríguez-Macias, R., Zamora-Natera, F., Bugarin-Montoya, R. & Carrillo-González, R. (2007). La humedad aprovechable y su relación con la materia orgánica y superficie específica del suelo. *Terra Latinoamericana*, 25(4), 419–425. <https://www.redalyc.org/pdf/573/57315558010.pdf>
- Sánchez-Hernández, R., Ramos-Reyes, R., Geissen, V., Mendoza-Palacios, J., Cruz-Lázaro, E., Salcedo-Pérez, E. & Palma-López, D. J. (2011). Contenido de carbono en suelos con diferentes usos agropecuarios en el trópico mexicano. *Terra Latinoamericana*, 29, 211–219.
- SAS Institute Inc. (2024). *SAS OnDemand para académicos*. https://www.sas.com/en_us/software/on-demand-for-academics.html
- Semarnat. (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 antes NOM-021-RECNAT-2000. *Diario Oficial de La Federación*, 1–73. <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69255.pdf>
- Sequeira, C. H., & Alley, M. M. (2011). Soil Organic Matter Fractions as Indices of Soil Quality Changes. *Soil Science Society of America Journal*, 75(5), 1766–1773. <https://doi.org/10.2136/sssaj2011.0067>
- Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S., & Denef, K. (2004). A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and tillage research*, 79(1), 7-31. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.03.008>
- Smreczak, B., & Ukalska-Jaruga, A. (2021). Dissolved organic matter in agricultural soils. *Soil Science Annual*. <https://doi.org/10.37501/soilsa/132234>
- Soil Survey Staff. (2014). *Soil taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys* (12th ed.). Natural Resources Conservation Service. U.S. Department of Agriculture Handbook 436.
- Taiz, L., Zeiger, E., Moller, I. M. & Murphy, A. (2015). *Plant Physiology and Development* (L. Taiz, E. Zeiger, I. M. Moller, & A. Murphy, Eds.; 6a ed.). Sinauer Associates Incorporated.
- Tang, Y., Cui, X., Xu, H., Peng, D., & Liang, B. (2024). Managing Residue Return Increases Soil Organic Carbon, Total Nitrogen in the Soil Aggregate, and the Grain Yield of Winter Wheat. *Agronomy*, 14(7), 1584. <https://doi.org/10.3390/agronomy14071584>
- van Es, H. (2017). A New Definition of Soil. *CSA News*, 62(10), 20–21. <https://doi.org/10.2134/csa2017.62.1016>
- Weisberger, D., Nichols, V., & Liebman, M. (2019). Does diversifying crop rotations suppress weeds? A meta-analysis. *PLOS ONE*, 14(7), e0219847. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0219847>
- West, T. O., & Post, W. M. (2002). Soil Organic Carbon Sequestration Rates by Tillage and Crop Rotation. *Soil Science Society of America Journal*, 66(6), 1930–1946. <https://doi.org/10.2136/sssaj2002.1930>