

1. Estructura, propiedad física del suelo: estado del arte



DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.299.01>

RODOLFO SERRATO CUEVAS*§

JOSÉ RAMÓN PASCUAL FRANCO MARTÍNEZ**

FRANCISCO GUTIÉRREZ RODRÍGUEZ***

ANDRÉS GONZÁLEZ HUERTA****

JOSÉ FRANCISCO RAMÍREZ DÁVILA*****

Resumen

El aumento constante de la población y el crecimiento de las ciudades requiere la producción de más alimentos, esto se puede lograr al expandir los campos agrícolas o incrementar el rendimiento por unidad de superficie, lo que puede conducir a la degradación de la propiedad física del suelo, denominada estructura. La estructura del suelo tiene un papel fundamental en la producción sostenible de alimentos, por lo tanto, es importante conocerla. Por tal motivo se describe su génesis, en la que actúan las fuerzas de cohesión y de tensión. El resultado de lo anterior son los microagregados caracterizados por un tamaño $<250 \mu\text{m}$, y los macroagregados con tamaño $>250 \mu\text{m}$. La estructura del suelo afecta el crecimiento de las plantas al influir

§ Autor para correspondencia: rserratoc@uaemex.mx

* Doctor en Ciencias Ambientales. Profesor de tiempo completo de la Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5639-4542>

** Doctor en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales. Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-2139-6203>

*** Doctor en Filosofía y Ciencias Técnicas. Profesor de tiempo completo en la Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1464-0976>

**** Doctor en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales. Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6055-7597>

***** Doctor en Fisiología y Biología Animal. Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8625-4655>

en la distribución de las raíces y la capacidad de absorber agua. El manejo del suelo con labranza reducida puede mejorar el movimiento, disponibilidad y calidad del agua. La adición de mantillo mejora la estructura del suelo, contrarresta la erosión y evaporación del suelo, a la vez que aumenta la acumulación del Carbono Orgánico del Suelo (COS). La aplicación de fertilizantes generalmente mejoran la agregación del suelo, pero pueden disminuir el COS, reduce la agregación y actividad microbiana. Por lo tanto, la estructura del suelo tiene un papel vital en la producción sostenible de alimentos.

Palabras clave: *estructura del suelo, microagregados, macroagregados, estabilidad estructural.*

Introducción

El aumento constante de la población y el crecimiento de las ciudades ha llevado a la necesidad de contar con más tierras dedicadas a la agricultura para la producción de más alimentos. Para lograrlo, se requerirá de expandir las tierras de cultivo y solamente se lograría talando bosques y transformando las praderas en campos agrícolas. Esto llevaría a una consecuencia, la degradación de la estructura del suelo y la pérdida de su calidad. La estructura del suelo permite el transporte de agua, nutrientes y contaminantes a través de la zona no saturada subyacente a los campos agrícolas (Abrishamkesh et al., 2011; Ali et al., 2016). La estructura del suelo tiene un papel vital, pero a menudo descuidado, en la producción sostenible de alimentos y en los logros hacia una sociedad bien desarrollada (Josa et al., 2010; Ali et al., 2016).

Por otro lado, la estructura del suelo es la disposición espacial de una amplia gama de tamaños y formas de poros (Peng, 2015). Así es como la forma, distribución y tamaño de los poros, afectan muchos a los procesos más importantes en el suelo que influyen en el desarrollo de la planta y facilidad de crecimiento de las raíces. Por esta razón, las mediciones del espacio poroso son cada vez más utilizadas para caracterizar la estructura del suelo (Bottinelli et al., 2015). La degradación mecánica de la estructura

del suelo a través de la compactación presenta un serio desafío para la agricultura, con los impactos en el aumento del peso de la maquinaria. Por lo tanto, un suelo bien estructurado tiene muchos espacios habitables y espacios de almacenamiento, un suelo mal estructurado está mucho menos dotado y es mucho menos productivo. Dado que la estructura del suelo proporciona vías para el transporte de agua, nutrientes y gases, y hábitats para los microorganismos y la fauna, es una propiedad fundamental de la fertilidad y la calidad del suelo. Finalmente, la estructura del suelo puede definirse como: la forma, tamaño y disposición espacial de las partículas individuales y grupos de partículas del suelo (agregados) o como la combinación de diferentes tipos de poros con partículas sólidas (agregados) (Chamen et al., 2015).

Génesis de la estructura

Fuerzas sobre las partículas del suelo e influencia en la génesis de la estructura del suelo.

La fuerza de cohesión entre partículas depende de una variedad de influencias físicas, químicas y biológicas del suelo, algunas de las más importantes son la tensión superficial aire-agua, las fuerzas de atracción intermoleculares entre el agua y los sólidos, la cementación por solutos precipitados, el entrelazamiento de raíces e hifas de hongos y diversos fenómenos químicos. Las fuerzas de cohesión del suelo dependen en gran medida del contenido de agua y otras condiciones. Fundamentalmente, las fuerzas importantes en la agregación son tensiones, es decir, la fuerza por unidad de área que actúa dentro del agregado. Estas se clasifican como esfuerzos de compresión, tracción y cortante. Las tensiones de compresión actúan para acercar las partículas del suelo (Yang et al., 2020). Las tensiones de tracción separan; por ejemplo, las fuerzas de la contracción del suelo. Los esfuerzos cortantes actúan a lo largo de un plano paralelo a la dirección de la fuerza como en un agregado en el borde de una zona de compactación. Los esfuerzos de tracción y cortante tienden a romper los agregados, los esfuerzos de compresión tienden a consolidar los agregados. El agua en el suelo retiene a las partículas del suelo a través de la tensión superficial que atrae moléculas

las de agua en los sólidos del suelo y entre sí. Las partículas del suelo tienen carga negativa, significa que el agua cercana a ellas es rica en iones positivos, lo que a su vez atrae a otras partículas en un proceso de floculación, un contenido mayor de arcilla de un suelo generalmente contribuye a una mayor agregación (Nimmo, 2005; Wang et al., 2015; Mundoagro, 2022).

Agregación de las partículas

Mecanismos de agregación

Existen varios mecanismos de agregación. Los agregados se forman en etapas, con diferentes mecanismos de unión que dominan en cada etapa (Tisdall y Oades, 1982). La teoría jerárquica de la agregación propone que los microagregados se unen para formar macroagregados (Edwards y Bremner, 1967). Los microagregados (<250) se forman a partir de moléculas orgánicas (MO) unidas a arcilla (Cl) y cationes polivalentes (P) para formar partículas compuestas (Cl-P-MO), que se unen con otras partículas (Cl-P-OM) para formar macroagregados [(Cl-P-OM) (Edwards y Bremner, 1967; Tisdall, 1996). Alternativamente, se pueden formar macroagregados alrededor de la materia orgánica particulada (MOP). A medida que se descompone la MOP y se liberan los exudados microbianos, el macroagregado se vuelve más estable (Plante y McGill, 2002a; Beare et al., 1994). A medida que se utiliza el COS más lábil y disminuye la actividad microbiana, disminuye el suministro de exudados y el macroagregado pierde estabilidad, eventualmente se imposibilita y libera microagregados más estables (Jastrow et al., 1998; Six et al., 1999; Mundoagro, 2022).

La precipitación de hidróxidos, fosfatos y carbonatos mejora la agregación. Los cationes como Si^{4+} , Fe^{3+} , Al^{3+} y Ca^{2+} estimulan la precipitación de compuestos que actúan como agentes de unión para las partículas primarias. Los cationes también forman puentes entre las partículas de arcilla y MOS que resultan en la agregación (García y Paterson, 2011; Schlüter y Koestel, 2022).

Niveles jerárquicos de la estructura del suelo y mecanismos de unión

Se cree que los dominios y cuasi cristales son las unidades microestructurales fundamentales en muchos suelos. Los dominios consisten en cristales multicapa de ilita o vermiculita de hasta 5 nm de espesor, apilados en una alineación aproximadamente paralela para formar unidades de hasta 1 μm de espesor y hasta 5 μm en la dirección x-y. Del mismo modo, los cuasi cristales consisten en capas individuales de montmorillonita (1 nm de espesor) alineadas con mucha superposición para formar unidades de varios nanómetros de espesor y hasta 5 μm en la dirección x-y. El modelo generalmente aceptado de un microagregado consiste en arreglos de dominios y cuasi cristales, partículas de arena y limo, combinados de alguna manera con polímeros orgánicos. La arcilla floculada es un prerrequisito para la estabilidad de los microagregados y la capacidad de resistir la ruptura por humectación y perturbación mecánica. Las interacciones como arcilla-materia orgánica, compuestos inorgánicos que actúan como cementos inter-partículas son factores importantes que intervienen en la floculación (White, 2006; Morris, 2023).

Existe un consenso bastante amplio para clasificar los agregados del suelo en dos categorías jerárquicas principales: microagregados (<250 μm de diámetro) y macroagregados (>250 μm de diámetro).

Microagregados

Los microagregados suelen dividirse en subclases <2 μm , 2-20 μm y 20-250 μm . Las propiedades sobresalientes de estas categorías de agregados se resumen a continuación.

Microagregados de menos de $<2\ \mu\text{m}$ de diámetro

Los microagregados parecen estar formados inicialmente por la floculación de partículas de arcilla en dominios o cuasicristales. Particularmente en agregados muy pequeños ($<0.2\ \mu\text{m}$), la mayor parte de la materia orgánica parece estar adsorbida solo en las superficies externas de los cuasicristales. Por lo tanto, la unión entre partículas en los cuasicristales del suelo se rige esencialmente por los mismos fenómenos de van der Waals y de la doble capa eléctrica que producen cuasicristales en sistemas simples de arcilla-agua. La exclusión de materia orgánica de las superficies internas del cuasi cristal parece bastante pronunciada en suelos montmorilloníticos donde las partículas de arcilla exhiben una estructura fuertemente orientada, mutuamente paralela, y en menor medida en suelos con mineralogía ílítica o caolinítica y, en consecuencia, dominios menos ordenados. Los microagregados muy pequeños son altamente resistentes a la interrupción mecánica, por lo general requieren varios minutos de dispersión ultrasónica, a menudo con la ayuda de un agente oxidante (Askari et al., 2015).

En un próximo nivel jerárquico, los cuasicristales y otras partículas minerales se unen alrededor de los núcleos de unión central de materiales orgánicos altamente procesados de naturaleza húmica y polisacárido. Los dominios de arcilla y otras partículas minerales en el exterior de estos microagregados protegen el núcleo orgánico interno contra el acceso de microorganismos. Dado que la carga eléctrica predominante de los polímeros orgánicos a valores de pH normales (cerca de la neutralidad) del suelo suele ser negativa, la unión con coloides inorgánicos cargados negativamente se logra en gran medida a través del enlace por cationes multivalentes como Ca^{2+} , Fe^{3+} , Al^{3+} y sus óxidos hidratados, que pueden formar complejos con las superficies minerales y los grupos funcionales orgánicos. En suelos altamente degradados con abundantes minerales de carga variable, el intercambio de los ligandos entre las superficies minerales y los grupos funcionales orgánicos puede producir enlaces fuertes. Esto es particularmente notable en los oxisoles, caracterizados por microagregados y microporosos extremadamente fuertes que resultan en una distribución bimodal característica del tamaño de poro (Cui y Holden, 2015).

Para que los microagregados se formen efectivamente en el suelo, los materiales aglutinantes orgánicos deben estar finamente distribuidos por todo el suelo, en lugar de depositarse en bolsas aisladas. Mecanismos particularmente efectivos parecen ser la biosíntesis *in situ* de materiales orgánicos por microorganismos asociados con extensas redes de raíces finas con altas tasas de rotación, como debajo de la vegetación de pastizales.

Los microagregados tienden a formarse lentamente en los suelos, pero una vez formados también se degradan lentamente incluso bajo sistemas de manejo desfavorable de los suelos. Se ha observado que las sustancias orgánicas en los microagregados se mantienen estables durante cientos y, en algunos casos, incluso miles de años. Entre los materiales orgánicos estabilizados se encuentran las enzimas que pueden contribuir a procesos como la mineralización de N y la degradación de herbicidas. La cantidad de carbono secuestrado en los microagregados del suelo constituye una fracción sustancial de la cantidad total del carbono orgánico en la Tierra. Esto ha despertado mucho interés en el impacto del manejo de la estructura del suelo en el CO₂ atmosférico (Synder y Vázquez, 2005; Yudina y Kuzyakov, 2023).

Microagregados de 2 a 20 µm de diámetro

Estos se forman a partir de dominios de arcilla orientados, microagregados de <2 µm de diámetro o arcilla gruesa y finas partículas de limo que se unen alrededor de un núcleo central de fragmentos de hifas y células o colonias bacterianas. La unión se efectúa mediante materiales microbianos como el polisacárido sintetizado por las bacterias y las hifas. La capa externa de los dominios de arcilla y microagregados protege a las bacterias de organismos como los nematodos y los protozoos, que son demasiado grandes para penetrar en la capa externa. Por lo tanto, se ha encontrado que hasta entre 40 a 60% de la biomasa microbiana en el suelo está asociada con microagregados de 2 a 20 µm de diámetro.

Al igual que los agregados de <2 m, los agregados de 2 a 20 µm son muy resistentes a la interrupción mecánica, a veces resisten hasta 5 minutos de dispersión ultrasónica (Synder y Vazquez, 2005; Yudina y Kuzyakov, 2023).

Microagregados de 20 a 250 μm de diámetro

Estos están formados en gran parte por partículas o agregados de $<20 \mu\text{m}$ de diámetro, unidos por un polisacárido alrededor de los núcleos centrales de raíces finas e hifas fúngicas. Generalmente la unión es lo suficientemente fuerte como para que los agregados sean estables al agitado por inmersión directa del suelo seco en agua (Synder y Vazquez, 2005).

Macroagregados

Debido a su efecto sobre el tamaño de los poros más grandes del suelo, estos agregados son muy influyentes para determinar las propiedades macroscópicas del suelo, como la resistencia mecánica, la conductividad hidráulica y el estado de la aireación. También son los agregados más susceptibles a la desintegración bajo tensiones debido a la labranza, la compactación, el impacto de las gotas de lluvia.

La formación de macroagregados ($>250 \mu\text{m}$) depende principalmente de la estabilización de los microagregados en unidades estructurales más grandes (White, 2006). A pesar de esto, la macroagregación parece ser causada principalmente por la reorientación y unión de partículas de arcilla y microagregados por raíces finas e hifas, y una mayor cementación por polisacáridos extracelulares. Asociaciones entre extensos sistemas de raíces finas y hongos micorrícicos arbusculares (MA), que producen grandes cantidades de polisacáridos, parecen particularmente efectivos en la formación de los macroagregados. Los hongos saprofitos también estabilizan los agregados, particularmente cuando se agregan sustratos al suelo como combinaciones de paja y estiércol (Synder y Vazquez, 2005).

La unión por los polisacáridos aparentemente no ocurre uniformemente en los macroagregados, sino principalmente en las grietas o poros más grandes (15 a $50 \mu\text{m}$ de diámetro), precisamente donde los agregados tienen más probabilidades de romperse. Debido a esta colocación eficiente de los enlaces, incluso pequeños aumentos o eliminaciones de polisacáridos pueden causar grandes aumentos o disminuciones en la estabilidad de los macroagregados. Debido a que los polisacáridos lábiles constituyen solo una

pequeña fracción de la cantidad total de la materia orgánica del suelo, no es sorprendente que el contenido total de materia orgánica del suelo no siempre se correlacione bien con la estabilidad de los macro agregados. Esto es particularmente poco cierto después de cambios repentinos en el manejo, donde los cambios en la materia orgánica total pueden ser mínimos, pero pueden haber ocurrido cambios significativos en la red de raíces finas, hifas fúngicas y polisacáridos asociados, con cambios rápidos asociados en la estabilidad del agregado (Thangavel et al., 2019; Yudina y Kuzyakov, 2023).

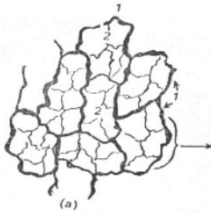
En los casos en que el contenido total de materia orgánica del suelo se correlaciona positivamente con la estabilidad de los macroagregados, el manejo a menudo ha sido estable durante largos períodos de tiempo, por ejemplo, bosque continuo, pasto o labranza. La alta correlación probablemente refleja no sólo la estabilización de los agregados por materia orgánica, sino también la estabilización de la materia orgánica por los agregados. Para un tipo dado de manejo del suelo, la correlación entre la materia orgánica y la estabilidad estructural puede ser altamente dependiente del suelo, y la textura juega un papel importante. En muchos casos, es necesario un cierto nivel umbral de materia orgánica antes de que los macroagregados comiencen a estabilizarse.

El valor umbral tiende a ser mayor al aumentar el contenido de arcilla del suelo, lo que sugiere que se debe exceder una cantidad crítica de materia orgánica por unidad de superficie mineral para que ocurra una agregación efectiva. Se puede dibujar un modelo idealizado a escala que muestre que un agregado de suelo está formado por unidades estructurales de varios tamaños, mantenidas juntas por varios agentes aglutinantes (Tisdall y Oade, 1982; Synder y Vazquez, 2005; Ali et al., 2016). Así es, como todos estos efectos dependen de mantener un alto nivel de actividad biótica (raíces de las plantas, animales principalmente lombrices de tierra y microorganismos) en el suelo, dichos efectos son más importantes en suelos con pH de 5.5 a 7. Por lo tanto, los aportes sustanciales de materia orgánica y la alteración mínima del suelo favorecen la estabilización de la macro agregación (Wang et al., 2015; Yudina y Kuzyakov, 2023).

Formas de la estructura

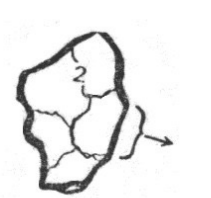
En un mismo suelo, pueden existir varias clases de agregados de tamaño diferente, pudiendo tener todos sensiblemente la misma forma o bien una forma particular. Éstas diferentes clases de agregados pueden ser reconocidas en la superficie del suelo, pero se observan mucho mejor en el perfil. Los pedólogos difieren en la forma de describir la morfología de la estructura, unos siguen la fragmentación cada vez más apretada de los agregados, como se muestra en seguida.

Sobreestructura



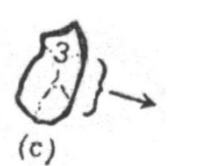
Resulta de la yuxtaposición, en conjunto poco coherentes de los agregados precedentes. Estos conjuntos son delimitados, sobre la totalidad del perfil o en un horizonte, por las grietas más sobresalientes.

Estructura propiamente dicha o elemental



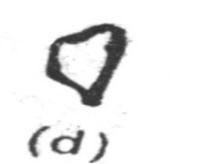
Corresponde a los agregados que se encuentran muy independientes unos de los otros y de hecho pueden aislarse fácilmente y dejar intacta la ordenación de los agregados vecinos.

Subestructura



Se manifiesta por la división de la estructura en agregados más pequeños bajo el efecto de un sistema de hendiduras que generalmente uno se ve obligado a acentuar por medio de un instrumento o de la presión de la mano para soltar los agregados.

Microestructura



Que sólo es visible con una lupa o al microscopio. Corresponde al modo de unión de los agregados más pequeños, entre los cuales se encuentran los signos de la actividad biológica del suelo (Gaucher, 1971).

Las formas de los agregados observables en el campo se pueden clasificar de la siguiente manera:

Laminar



Los peds son en forma de láminas, las dimensiones horizontales son mayores a las verticales, las caras normalmente se traslapan en forma horizontal. Heredada en materiales depositados bajo el agua, por ejemplo: en suelos de llanuras de inundación. Originadas por el impacto de las gotas de lluvia en costras superficiales. Impide la penetración vertical de las raíces, el agua y el aire.

Prismática



Los peds semejan prismas, las caras verticales son planas y ligeramente redondeadas y más largas que las horizontales, las caras son moldeadas por las de los peds circundantes, los verticales son angulares o subredondeados, las superficies horizontales son algo indistintas y normalmente planas. Típica de horizontes enriquecidos en arcilla, Bt, endopediones argílicos. Los planos de debilidad corresponden a grietas de retracción. Los prismas pueden presentar una gran dureza y las raíces no ser capaces de penetrar en ellos.

Columnar



Los peds son parecidos a los de la estructura prismática, con la diferencia de que en la estructura columnar las superficies superiores de los peds son redondeados. Prismas rematados en la parte superior por una cápsula. Típica de suelos alcalinos (endopediones nátricos).

Blocosa angular



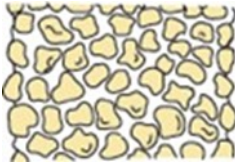
Los peds están en forma de bloques o poliedros, las tres dimensiones son casi de la misma magnitud, las caras son planas o ligeramente redondeadas y se intersectan en ángulos relativamente abruptos, las caras son moldeadas por los peds circundantes. Frecuente en endopediones cámbicos.

Blocosa subangular

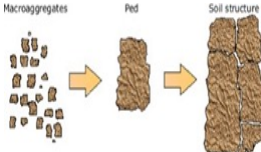
Los peds son parecidos a los de la estructura blocosa angular con excepción de que las caras son planas y redondeadas y los vértices son redondeados. Típica de suelos de zonas semiáridas y áridas, pobres en materia orgánica. Frecuentes en epipediones ocrícos y endopediones cámbico y cálcico.

Granular

Los peds son esféricos o poliedros, las caras son muy irregulares y no son moldeadas por los peds circundantes. Es la estructura más favorable típica de medios biológicamente activos ricos en bases y con materia orgánica. Epipediones de praderas y frecuentes en mólicos.

Migajosa

Epipediones con materia orgánica bien evolucionada. Como migajas de galletas y generalmente de menos de 5 mm de diámetro.

Estructura compuesta

Comúnmente varios peds pequeños, forman un ped más grande, situación que se denomina estructura compuesta. Cuando se trata de la descripción del suelo en un texto se expresa como: estructura prismática gruesa, moderadamente desarrollada que se disgrega en bloques medianos, moderadamente desarrollados (Gaucher, 1971; Olivares et al., 2023).

Estructura del suelo y crecimiento de las plantas

La estructura del suelo afecta el crecimiento de las plantas al influir en la distribución de las raíces y la capacidad de absorber agua y nutrientes (Rampazzo et al., 1998; Pardo et al., 2000). La estructura del suelo facilita la infiltración de oxígeno, agua que puede mejorar su almacenamiento. El aumento de la transferencia de agua a través del suelo puede reducir la retención de fertilizantes en la matriz del suelo y la eficiencia del uso de fertilizantes en las plantas. La alteración de la estructura del suelo a través de la compactación o la labranza puede resultar en el reciclaje rápido de

nutrientes, formación de costras, disponibilidad reducida de agua y aire para las raíces (Agriculture Victoria, 2019; Olivares et al., 2023).

Manejo para mejorar la estructura del suelo

El manejo del suelo para mejorar su estructura tiene el potencial de incrementar la producción de los cultivos, aumentar la cantidad de carbono depositado en el suelo y disminuir la tasa de pérdida de carbono por descomposición y erosión. En consecuencia, las prácticas de manejo del suelo que pueden contribuir a mejorar la estructura del suelo.

Labranza

La labranza perturba los agregados del suelo, compacta el suelo y perturba las comunidades de plantas y animales que contribuyen a la agregación. Reduce la MOS, los nutrientes, la actividad microbiana y las actividades de la fauna que contribuyen a la agregación. En comparación con el arado, los sistemas de manejo de labranza cero tienen agregados y COS más estables. La labranza reducida puede resultar en más poros y canales que influyen en el movimiento, la disponibilidad y la calidad del agua. A su vez, esto influye en la pérdida de nutrientes y el drenaje químico al agua subterránea (Johns, 2015; Olivares et al., 2023).

Manejo de mulching y residuos

Los mantillos mejoran la estructura del suelo de diversas formas. La adición de mantillo a la superficie del suelo disminuye la erosión, reduce la evaporación, protege contra el impacto de las gotas de lluvia y aumenta la estabilidad de los agregados. Los mantillos aumentan la acumulación de COS, modifican los regímenes de temperatura y humedad e impactan en la fauna del suelo (Tobiašová et al., 2023).

Abono

El abono mejora la estructura y densidad del suelo, aumenta la agregación, pero puede disminuir la estabilidad de los agregados del suelo frente a las acciones de disolución y dispersión. El aumento de COS da como resultado una mayor actividad biológica, aumenta la porosidad y la consiguiente disminución de la densidad aparente. El incremento de la actividad microbiana debido a los aumentos en el carbono del suelo de las aplicaciones de estiércol da como resultado un acrecentamiento en la estabilidad de los agregados. Los suelos abonados también tienen una alta población de lombrices. Los suelos no abonados suelen contener menos COS y microbios, y son más densos que los suelos abonados (Johns, 2015).

Compost

La aplicación de compost al suelo mejora la estructura y reduce la densidad aparente. Los materiales de compostaje pueden aumentar la agregación y la estabilidad de los agregados. Las condiciones ambientales como la sequía pueden limitar la efectividad del abono. Los efectos de las adiciones de compost sobre la estructura del suelo pueden ser de corta duración, aunque los resultados son generalmente positivos (Tobiašová et al., 2023).

Fertilizantes y nutrientes

Las complejidades de las influencias químicas y físicas de los fertilizantes dan como resultado efectos variables sobre la agregación. Las aplicaciones de fertilizantes generalmente mejoran la agregación del suelo; sin embargo, en algunas condiciones, los fertilizantes también pueden disminuir la concentración de COS, reducir la agregación y reducir las comunidades microbianas en comparación con los suelos abonados. Cuando se aplica correctamente, el fertilizante mejorará el manejo de los nutrientes, aumentará la productividad de las plantas, aumentará el COS y promoverá la actividad

biológica. Estos efectos, internos, aumentan la agregación y mejoran la densidad (Johns, 2015; Huan Fang et al., 2023).

Conclusiones

La estructura del suelo tiene un papel vital, pero a menudo pasado por alto, en la producción sostenible de alimentos y el bienestar del medio ambiente. Los cambios en la estructura del suelo pueden tener consecuencias manifiestas a nivel local y global. Puede afectar el vigor y el rendimiento de plantas individuales y también los ciclos biogeoquímicos del carbono, el nitrógeno y el agua. Mejorar la estructura del suelo puede incluso tener el potencial de ayudar a moderar los efectos del cambio climático mediante el secuestro de gases de efecto invernadero en el suelo. Por lo tanto, las investigaciones futuras que reconozcan la naturaleza interrelacionada de los tres componentes de la fertilidad del suelo: el químico, biológico y estructural, pueden proporcionar la base para una agricultura continua y sostenible y ayudar a abordar los desafíos de la degradación ambiental, lo que guarda una estrecha relación con la denominada agricultura regenerativa.

Referencias

- Abrishamkesh, S., Gorji, M., y Asadi, H. (2011). Long-term effects of land use on soil aggregate stability. *International Agrophysics*, 25, 103-108.
- Agriculture Victoria (2019). *Bonding and Aggregation*. Victorian Resources Online.
- Zolfaghari, A. A., Taghizadeh-Mehrjardi, R., Asadzadeh, F., y Hajabbasi, M. A. (2016). Soil structure changes due to different land-use practices in the central Zagruos region, Iran. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 62(2), 163-175. <https://doi.org/10.1080/03650340.2015.1043898> <https://doi.org/10.1080/03650340.2015.1043898>
- Askari, M. S., Cui, J. F., O'Rourke, S. M., y Holden, N. M. (2015). Evaluation of soil structural quality using VIS-NIR spectra. *Soil Tillage Research*, 146, 108-117.
- Beare, M. H., Hendrix, P. F., y Coleman, D. C. (1994). Water-stable aggregates and organic matter fractions in conventional- and no-tillage soils. *Soil Science Society of America Journal*, 58, 777-786.
- Bottinelli, N., Jouquet, P., Capowiez, Y., Podwojewski, P., Grimaldi, M., Peng, X. (2015).

- Why is the influence of soil macrofauna on soil structure only considered by soil ecologists? *Soil and Tillage Research*, 146, 118-124.
- Cui, J. F., y Holden, N. M. (2015). The relationship between soil microbial activity and microbial biomass, soil structure and grassland management. *Soil and Tillage Research*, 146, 32-38.
- Chamen, T. W. C., Moxey, A. P., Towers, W., Balana, B., y Hallett, P. D. (2015). Mitigating arable soil compaction: a review and analysis of available cost and benefit data. *Soil and Tillage Research*, 146, 10-25.
- Christopher, J. (2015). *Soil Structure and the Physical Fertility of Soil. Research Manager, Northern Australia and Land Care*. Future Directions International Pty L.
- Edwards, A. P., y Bremner, J. M. (1967). Microaggregates in soils. *Journal of Soil Science*, 18, 64-73.
- Franzluebbers, A. J. (2002). Water infiltration and soil structure related to organic matter and its stratification with depth. *Soil and Tillage Research*, 66, 197-205.
- García-Pausas, J., y Paterson, E. (2011). Microbial community abundance and structure are determinants of soil organic matter mineralisation in the presence of labile carbon. *Soil Biology and Biochemistry*, 43, 1705-1713.
- Gaucher, G. (1971). *Tratado de Pedología Agrícola. El Suelo y sus Características Agronómicas*. Ediciones Omega.
- Huan Fang, Kailou Liu, Daming Li, Xinhua Peng, Weijian Zhang, Hu Zhou. (2021). Long-term effects of inorganic fertilizers and organic manures on the structure of a paddy soil. *Soil and Tillage Research*, 213.
- Jastrow, J. D. (1996). Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter. *Soil Biology and Biochemistry*, 28, 665-676.
- Josa, R., Ginovart, M., y Solé, A. (2010). Effects of two tillage Techniques on soil macroporosity in subhumid environment. *International Agrophysics*, 24, 139-148.
- Morris, J. (2023). *Estructura saludable del suelo - La Casa de la Vida. Agricultura Sustentable*. <https://attra.ncat.org/es/estructura-saludable-del-suelo-la-casa-de-la-vida/>
- Nimmo, J. R. (2005). Aggregation: Physical Aspect. En *Encyclopedia of Soils in the Environmental*. US Geological Survey.
- Olivares Barlin, O. et al. (2023). Relationships between the Visual Evaluation of Soil Structure (VESS) and soil properties in agriculture: A meta analysis. *Scientia Agropecuaria*, 14(1), 67-78. <http://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2023.007>
- Ortega Blu, R., y Martínez, M. M. (2022). La estructura del suelo es un indicador que afecta directamente la producción. *Revista Mundoagro*. La estructura del suelo es un indicador que afecta directamente la producción. Mundoagro.
- Pardo, A., Amato, M., y Chiaranda, F. Q. (2000). Relationships between soil structure, root distribution and water uptake of chick-pea (*Cicer arietinum* L.). Plant growth and water distribution. *European Journal Agronomy*, 13, 39-45.
- Peng, X., Horn, R., y Hallett, P. (2015). Soil structure and its functions in ecosystems: Phase matter y scale matter. *Soil and Tillage Research*, 146, 1-3. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.10.017>
- Plante, A. F., y McGill, W. B. (2002). Soil aggregate dynamics and the retention of orga-

- nic matter in laboratory-incubated soil with differing simulated tillage frequencies. *Soil and Tillage Research*, 66, 79-92.
- Rampazzo, N., Blum, W. E. H., y Wimmer, B. (1998). Assessment of soil structure parameters and functions in agricultural soils. *Bod- enkultur* 49, 69-84.
- Schlüter, Steffen and Koestel Jhon (2022). Soil structure. *Encyclopedia of soil in the environmental* (Vol. 5, 2ª ed.). Elsevier.
- Six, J., Elliott, E. T., y Paustian, K. (1999). Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems. *Soil Science Society of American Journal*, 63, 1350-1358.
- Synder, V. A., y Vázquez, M. A. (2005). *Structure*.
- Ramesh, T., Bolan, N. S., Kirkham, M. B., Wijesekara, H., Kanchikerimath, M., Rao, C. S., Sandeep, S., Rinklebe, J., Ok, Y. S., & Choudhury, B. U. (2019). Soil Organic Carbon Dynamics: Impact of Land Use Changes and Management Practices: A Review. *Advances in Agronomy*, 156, 1-107. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2019.02.001>
- Tisdall, J. M. (1996). Formation of soil aggregates and accumulation of soil organic matter. En M. R. Carter y B. A. Stewart (Eds.), *Structure and Organic Matter Storage in Agricultural Soils* (pp. 57-96). CRC Press/Lewis Publishers.
- Tisdall, J. M., y Oades, J. M. (1982). Organic matter and water-stable aggregates in soils. Department of Soil Science, Waite Agricultural Research Institute, University of Adelaide, Glen Osmond, South Australia. *Journal of Soil Science*, 33, 141-163.
- Tobiašová, E., Lemanowicz, J., Debska, B., Kunkelová, M., y Sakác, J. (2023). Suitability of Various Parameters for the Determination of the Condition of Soil Structure with Dependence to the Quantity and Quality of Soil Organic Matter. *Journals Sustainability*, 15(14). <https://doi.org/10.3390/su151411047>
- White E., R. (2006). *Principles and Practices of Soil Science. The Soil as a Natural Resource* (Parr. 59-154). Blackwell, Publishing.
- Wang, E., Cruse, R. M., Zhao, Y., y Chen, X. (2015). Quantifying soil physical condition based on soil solid, liquid and gaseous phases. *Soil and Tillage Research*, 146, 4-9.
- Yang, T., Siddique, K, K. H. M., y Liu, K. (2020). *Cropping systems in agriculture and their impact on soil health. A review*. Global Ecology and conservation. E01118. <https://doi.org/10.1016/j.geico.2020.e1118>
- Yudina, A., y Kusyakov, Y. (2023). Dual nature of soil structure: The unity of aggregates and pores. *Geoderma*, 434.