

LOS BENEFICIOS DEL COMPOSTAJE Y LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA CUANDO SE APLICA AL SUELO

AUTORES:

Jane Gilbert

Marco Ricci-Jürgensen

Aditi Ramola



Contenidos

1	Resumen Ejecutivo	4
2	Introducción	6
3	Entendido el suelo	8
3.1	El papel del suelo	9
3.2	Amenazas para el suelo	9
3.3	Porque es importante la materia orgánica del suelo	10
4	Transformación de los residuos orgánicos putrescibles durante el tratamiento biológico	14
4.1	Composición de los bioresiduos	15
4.2	El papel de los microorganismos	16
4.3	Compostaje	17
4.4	Digestión Anaeróbica	18
5	Los beneficios de las enmiendas de materia orgánica del suelo	19
5.1	Clasificación de las enmiendas orgánicas	20
5.2	Los beneficios de aplicar compost al suelo	21
5.2.1	El contenido de materia orgánica del suelo	21
5.2.2	Potencial de secuestro de carbono	22
5.2.3	Estructura del suelo	26
5.2.4	Capacidad de retención del agua	27
5.2.5	La biología del suelo	28
5.2.6	La fertilidad del suelo	29
5.2.7	La capacidad de intercambio de cationes del suelo y el PH	29
5.2.8	Calidad y contaminación del suelo	29
5.3	Los beneficios de aplicar digestato al suelo	30
5.3.1	La materia orgánica y la estructura del suelo	30
5.3.2	Biología del suelo	30
5.3.3	La fertilidad del suelo	30
6	Conclusiones	31
7	Referencias	32
	Autores	36

Resumen Ejecutivo

El suelo es una mezcla compleja de minerales, materia orgánica, aire y agua. Puede demorar miles de años en formarse, pero puede ser destruido muy rápidamente (a veces en décadas) debido a las malas prácticas de gestión de la tierra, el desarrollo urbano y los efectos del cambio climático. El suelo cubre la mayor parte de la superficie de la Tierra y soporta casi toda la vida terrestre. Sin embargo, está amenazado: se cree que alrededor de un tercio está entre medianamente y altamente degradado debido, entre otras cosas, a la erosión, el agotamiento de los nutrientes y la contaminación. En los últimos 40 años, alrededor del 30% de las áreas de cultivo del mundo se han vuelto improductivas, y se estima que cada año se pierden 10 millones de hectáreas de tierras agrícolas debido a la erosión del suelo.

Se estima que se generan cada año a nivel mundial poco menos de mil millones de toneladas de residuos sólidos orgánicos municipales, aunque alrededor de un tercio de ellos no se gestionan de manera "ambientalmente segura", lo que conduce a la creación de olores, la liberación a la atmósfera del poderoso gas metano y la atracción de plagas. La gran mayoría de estos residuos orgánicos putrescibles se derivan del suelo, ya sea directamente como plantas

(como los cultivos agrícolas y hortícolas, los restos de alimentos de origen vegetal y los residuos de huertos, jardines, bosques) o indirectamente como productos

animales (como la carne, la leche, los abonos y los residuos de los mataderos). Como estos residuos orgánicos putrescibles son un recurso valioso, que contiene tanto carbono como nutrientes vegetales, su reciclaje mediante el compostaje y la digestión anaeróbica ayuda a devolver estos valiosos recursos al suelo del que se derivaron originalmente

Los residuos orgánicos putrescibles están compuestos por una variedad de compuestos orgánicos, de los cuales la celulosa es el principal constituyente químico, seguido de la lignina y la hemicelulosa. Una diversa gama de microorganismos son responsables de la biodegradación de los residuos orgánicos putrescibles, predominando las bacterias en los sistemas de digestión anaeróbica, y tanto las bacterias como los hongos son fundamentales para el proceso de compostaje.

La lignina, que es el componente estructural de la madera, está presente en los residuos orgánicos putrescibles derivados de parques y jardines. Sólo se degrada en ambientes aeróbicos (que contienen oxígeno) por la acción de algunos hongos y ciertos tipos de bacterias llamadas actinomicetos.

El proceso de compostaje implica un proceso bioquímico llamado "humificación" que resulta en la formación de materia orgánica estable (sustancias húmicas). Sin embargo, hay pocas pruebas científicas de que se produzca humificación durante la digestión anaeróbica, lo que refleja tanto el proceso como las propiedades de los residuos de esa digestión.

Los experimentos han demostrado que cuando los residuos orgánicos putrescibles se convierten en abono, en lugar de aplicarlos directamente, quedan mayores cantidades de carbono en el suelo. Además, se cree que la materia orgánica del compost se transforma aún más a través de los microbios del suelo en formas más estables de carbono.

El compost puede clasificarse como un mejorador orgánico del suelo

Ya que contribuye positivamente al contenido de materia orgánica del suelo pero tiene bajos niveles de nutrientes en relación con el digestato proveniente de la digestión anaeróbica. Esto ayuda a mejorar la estructura del suelo, reduce la erosión, ayuda a mantener la inclinación del suelo y actúa como un "banco de nutrientes". Se ha demostrado que la aplicación de abono al suelo aumenta la biomasa microbiana del suelo y la actividad microbiana, y crea una reserva de nutrientes para las plantas. También es un importante depósito de carbono, que almacena más que la atmósfera y la vegetación terrestre combinadas.

El compost tiene el potencial de capturar carbono en el suelo:

- Hay estudios que demuestran que en un período de 4 a 12 años entre el 11% y el 45% del carbono orgánico aplicado al suelo como abono permaneció como carbono orgánico del suelo.

- Es posible que el **carbono orgánico del suelo** aumente entre 50-70 kg C ha⁻¹ yr⁻¹ t⁻¹ de sólidos secos aplicados como abono.

- Cada **tonelada** de carbono orgánico del suelo contiene el equivalente a unas 3,67 toneladas de dióxido de carbono atmosférico.

- Una **tonelada** (masa fresca) de abono derivado de residuos verdes aplicado al suelo en más de una hectárea (10.000 metros cuadrados) resulta en un ahorro neto de CO₂-eq de 143 kg ha⁻¹ año⁻¹ debido únicamente al aumento de la materia orgánica del suelo.

Se cree que los principales beneficios para los suelos después de la aplicación del compost se obtienen en los primeros 20 años hasta que se alcanza un nuevo equilibrio de materia orgánica. Se demostró que la aplicación repetida de abono aumenta la estabilidad de los agregados del suelo y la estructura de los poros del suelo, reduce la compactación y aumenta la capacidad de retención de agua.

El digestato puede clasificarse como un fertilizante orgánico

Como su principal función es suministrar nutrientes vegetales. Varios estudios han demostrado un mayor rendimiento de los cultivos después de la aplicación del digestato debido a su alto contenido en nutrientes; como éstos están presentes en forma mineral, están fácilmente disponibles para su absorción por los cultivos. Sin embargo, en comparación con el compost, hay pocas pruebas de humificación durante el proceso de digestión anaeróbica y los materiales que contienen lignina generalmente no se tratan de manera anaeróbica. Los beneficios a largo plazo del proceso del digestato para el suelo son menos claros que los del compost, y se cree que a largo plazo tiene un efecto insignificante en la materia orgánica del suelo.

El lector debe tener presente que este informe se basa en la materia orgánica del suelo y, por lo tanto, el valor del biogás producido durante la digestión anaeróbica no se ha tenido en cuenta en el presente documento; sin embargo, al hacer una comparación más general entre el compostaje y la digestión anaeróbica de los residuos orgánicos putrescibles, los planificadores y los encargados de la toma de decisiones deben tener en cuenta la importante función del biogás, un combustible renovable y neutro en cuanto al carbono.

Centrándose en los beneficios de reciclar los residuos orgánicos putrescibles y devolverlos a los suelos, en la mayor parte del mundo, el compostaje y la digestión anaeróbica se llevan a cabo principalmente como procesos mutuamente excluyentes. La generación de biometano durante la EA proporciona una valiosa fuente de energía de combustible no fósil y un fertilizante orgánico; sin embargo, los beneficios para el suelo pueden mejorarse aún más mediante una eficaz estabilización aeróbica posterior para transformar cualquier carbono residual en el digestato en formas más estables.

Por lo tanto, las consecuencias para el aumento del contenido de materia orgánica del suelo son potencialmente importantes.

El próximo informe de esta serie ofrecerá estimaciones de los posibles beneficios teóricos para el suelo que pueden lograrse a nivel mundial y en varios países diferentes, cada uno de los cuales tiene diferentes tipos de suelo y condiciones climáticas.

Introducción

La importancia de la calidad del compost y el digestato

En el presente informe se exponen los beneficios para el suelo a partir de la aplicación de abono y digestato anaeróbico derivados de los residuos sólidos orgánicos, habiéndose obtenido la información de documentos científicos o informes gubernamentales examinados por homólogos.

Es importante señalar que los beneficios descritos en este informe sólo pueden obtenerse si el compost/digestato es de alta calidad; es decir, si no está contaminado. Los contaminantes físicos y químicos, como los plásticos, el vidrio, los metales, los metales pesados y las sustancias orgánicas, pueden contaminar el suelo y tienen el potencial de acumularse a lo largo del tiempo tras la aplicación repetida de compost/digestato contaminado. Esto no es sostenible, y tampoco es deseable.

El compost y el digestato de calidad sólo deben derivarse de materias primas orgánicas (biorresiduos) limpias que se hayan mantenido y recolectado en forma separada de otros residuos. Además, también es importante asegurar la calidad de los procesos de compostaje o digestión anaeróbica, sometiendo los productos finales a pruebas periódicas para controlar su calidad. En muchas partes del mundo existen normas de calidad, por lo que los lectores deben consultar las que sean más pertinentes a su situación local.

Debido a las diferentes características y a los posibles niveles de contaminación de los residuos mixtos derivados del compost/digestato, los lodos de depuración y el biocarbón, estos materiales se han excluido del ámbito de aplicación de este documento.

El vínculo entre los residuos orgánicos putrescibles y el suelo

- La producción de residuos orgánicos putrescibles (generación urbana de RSU) asciende a unos **935 millones** de toneladas / año.
- Alrededor de **0,35 kg** per cápita de residuos orgánicos putrescibles se producen cada día.
- Alrededor del 33% de los residuos sólidos municipales del mundo no se gestionan de forma "ambientalmente segura", lo que da lugar a olores, plagas y generación de metano.
- Aproximadamente el **80%** de las tierras agrícolas del mundo sufren una erosión de moderada a grave.
- Se estima que cada año se pierden **10 millones** de hectáreas de tierras agrícolas a causa de la erosión del suelo (~0,7% del total).
- En los últimos 40 años cerca del **30%** de las tierras de cultivo del mundo se han vuelto improductivas.
- El **reciclaje de la materia orgánica** puede ayudar a resolver estos problemas.
- Se refiere a los **Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas** 12 y 15.

Objetivos de desarrollo sostenible de las Naciones Unidas

La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible fue adoptada por todos los Estados Miembros de las Naciones Unidas en 2015 y establece un marco para la paz y la prosperidad de los pueblos y el planeta.

Hay un total de 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), cada uno de los cuales tiene una serie de metas específicas (169 en total), que proporcionan un marco de acción.

Los objetivos más relevantes para este informe incluyen:

Objetivo 12 - Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles

- 12.2 - **para el año 2030**, lograr la gestión sostenible y el uso eficiente de los recursos naturales
- 12.4 - **para el año 2020**, lograr la gestión ambientalmente racional de los productos químicos y todos los residuos
- 12.5 - **para el año 2030**, reducir sustancialmente la generación de residuos mediante la prevención, la reducción, el reciclado y la reutilización

Objetivo 15 - Proteger, restaurar y promover la utilización sostenible de los ecosistemas terrestres, la ordenación sostenible de los bosques, la lucha contra la desertificación, y detener e invertir la degradación de las tierras y la pérdida de la diversidad biológica

- 15.3 - **para el año 2030**, combatir la desertificación, restaurar la tierra y el suelo degradados

<https://sustainabledevelopment.un.org/>

En todo el mundo los residuos orgánicos putrescibles constituyen una fracción significativa de la corriente de residuos sólidos, con estimaciones de entre el 44 y el 46% (en masa) de la fracción de residuos sólidos municipales (RSU). Se cree que se producen anualmente algo menos de mil millones de toneladas de residuos orgánicos putrescibles, lo que equivale a 0,35 kg / cápita / día (ISWA, en prensa). Con la creciente urbanización y el aumento de la población mundial, esto significa que los residuos orgánicos putrescibles surgidos no sólo seguirán creciendo sino que se **concentrarán cada vez más en las ciudades.**

El Banco Mundial ha estimado que en 2016, al menos el 33% de los residuos sólidos municipales del mundo no se gestionaron de forma "ambientalmente segura" (Kaza et al. 2018). Como la mayoría de la fracción de los residuos orgánicos es altamente putrescible, puede descomponerse rápidamente, creando olores, atrayendo plagas y emitiendo metano (un poderoso gas de efecto invernadero). Esto representa un importante desafío para los planificadores y gestores de residuos, los administradores urbanos y los ciudadanos, ya que su recogida eficiente y su tratamiento eficaz es un servicio de salud pública clave que también tiene repercusiones mundiales en lo que respecta al cambio climático.

La gran mayoría de los residuos orgánicos putrescibles se derivan del suelo, ya sea directamente como plantas (como los cultivos agrícolas y hortícolas, y los residuos de jardines/terrenos/forestación) o indirectamente como productos animales (como la carne, la leche, los abonos y los residuos de los mataderos). Esto significa que el suelo es la principal fuente de la mayoría de los residuos orgánicos putrescibles generados¹. Sin embargo, se reconoce cada vez más que la calidad del suelo en todo el mundo está disminuyendo. Se ha estimado que el 80% de las tierras agrícolas del mundo sufren una erosión de moderada a grave, y que cada año se pierden 10 millones de hectáreas (ha) de tierras agrícolas a causa de la erosión del suelo. Es preocupante que en los últimos 40 años, alrededor del 30% de las tierras de cultivo del mundo se han vuelto improductivas, y la pérdida de materia orgánica del suelo se cita como uno de los principales contribuyentes (Pimentell & Burgess 2013).

El vínculo entre los residuos orgánicos de las sociedades de reciclaje (a través del compostaje y la digestión anaeróbica) y el suelo del que se han generado estos residuos no está tan bien definido como debería. Los agricultores y agrónomos conocen desde hace milenios los beneficios de la aplicación de una variedad de residuos

orgánicos a los suelos agrícolas; sin embargo, estos beneficios a menudo sólo se comunican en términos de aumento de los rendimientos de los cultivos debido a su contenido en fertilizantes. Sus efectos sobre el contenido de materia orgánica de un suelo a menudo se pasan por alto, o se dejan en manos de los especialistas en suelos, donde existen muchos informes detallados; es un tema que rara vez se considera al elaborar estrategias de gestión y reciclado de desechos sólidos, aunque actualmente se está estudiando en la Unión Europea como parte de las reformas de la Política Agrícola Común (Comisión Europea 2019).

Por consiguiente, el objetivo de este informe es ayudar a llenar el vacío de información sobre los beneficios de la materia orgánica en el compost y el digestato cuando se aplica a los suelos, y aborda directamente algunos de los Objetivos de Desarrollo Sostenible establecidos por las Naciones Unidas (véase el recuadro). Está dirigido a los miembros de la ISWA, a los planificadores y gestores de residuos, a los funcionarios encargados de la formulación de políticas y a otros interesados que se interesan por el vínculo entre la gestión sostenible de los residuos y las prácticas agrícolas y de tierras sostenibles.

Este informe revela los hallazgos de numerosos documentos científicos revisados por pares. Resume algunas de las cuestiones importantes en un formato que puede ser leído y comprendido por profesionales de una amplia gama de sectores y antecedentes educativos.

De acuerdo con el mandato del proyecto acordado por ISWA, se ha hecho hincapié en los residuos sólidos orgánicos, pero se excluyen los lodos de depuración y el biocarbón. Además, este informe no constituye una evaluación del ciclo de vida o un análisis de inventario de gases de efecto invernadero.

¹ Los ambientes marinos y otros ambientes acuáticos conforman el resto.



Interpretando el suelo

Suelo

- El suelo es una mezcla compleja de minerales, materia orgánica, aire y agua.
- El suelo varía considerablemente y puede tardar muchos miles de años en formarse; pero puede ser destruido muy rápidamente (en décadas) debido a las malas prácticas de gestión de la tierra, el desarrollo urbano y los efectos del cambio climático
- El suelo cubre la mayor parte de la superficie terrestre y soporta casi toda la vida terrestre; es el principal receptor del compost y del digestato.
- El 33 por ciento del suelo está de moderada a alta degradación debido a la erosión, el agotamiento de los nutrientes, la acidificación, la salinización, la compactación y la contaminación química.
- La materia orgánica del suelo ayuda a proporcionar la estructura del suelo, reduce la erosión, mejora la retención de agua, ayuda a mantener la inclinación del suelo y actúa como un "banco de nutrientes"¹.
- La materia orgánica del suelo es una importante reserva de carbono, que almacena más que la atmósfera y la vegetación terrestre juntas.

Como el suelo es el principal receptor del compost y el digestato, es importante entender qué es y cómo se ve influenciado por las adiciones de materia orgánica. En este capítulo se ofrece un breve panorama general de la composición del suelo, su papel y función, y los efectos de la aplicación de la materia orgánica.

Definición de suelo

El suelo es una mezcla compleja de minerales, materia orgánica, aire y agua. Los minerales se derivan en gran medida de las rocas subyacentes, la materia orgánica de las plantas, los animales y los microbios que viven en las capas superiores o en ellas, y el agua de las precipitaciones y de las fuentes subterráneas.

El suelo es una función de los efectos combinados del clima, la topografía, los animales y las plantas, y las formas en que estos interactúan con la geología subyacente.

La capa superior del suelo es la capa más externa del suelo. Tiene la mayor concentración de materia orgánica y microorganismos y es donde se produce la mayor parte de la actividad biológica del suelo de la Tierra.

A nivel mundial, el suelo varía considerablemente y puede tardar muchos miles de años en formarse. Sin embargo, también puede ser destruido muy rápidamente debido a las malas prácticas de explotación de la tierra, el desarrollo urbano y los efectos del cambio climático.

Composición promedio del suelo



Figura 3.1 – El papel del suelo

El suelo cubre la mayor parte de la superficie terrestre y soporta casi toda la vida terrestre.

Es un recurso no renovable y suministra una serie de beneficios de los ecosistemas, además de proporcionar a los seres humanos un medio para cultivar alimentos (Figura 1). Debido a la complejidad inherente de estos recursos, es difícil hacer estimaciones económicas.



Amenazas para el suelo

Aunque los suelos pueden tardar muchos miles de años en formarse, también pueden ser destruidos muy rápidamente. El fenómeno de los años 30 en Estados Unidos conocido como "Dust Bowl" ilustra cómo las malas prácticas de gestión de la tierra condujeron a pérdidas catastróficas de la capa superior del suelo en un decenio, lo que tuvo efectos sociales, ambientales y económicos devastadores (véase el recuadro).

Hoy en día, la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO 2015a) ha estimado que "el 33 por ciento del suelo está de moderado a altamente degradado debido a la erosión, el agotamiento de nutrientes, la acidificación, la salinización, la compactación y la

contaminación química". Esta estimación contrasta con la de Pimentel & Burgess (2013) que sugirió que aproximadamente el 80% de la tierra agrícola del mundo (que es alrededor del 50% de la superficie total de la tierra) sufre de moderada a severa erosión.

Los autores también señalan que: "el suelo se está perdiendo de las zonas agrícolas entre 10 y 40 veces más rápido que el ritmo de formación del suelo, poniendo en peligro la seguridad alimentaria de la humanidad".

El Dust Bowl de los años 30

El Dust Bowl afectó a partes de los Estados Unidos y Canadá durante el decenio de 1930 y fue el resultado de la explotación profunda de los pastizales de las praderas nativas durante la década anterior. Estas prácticas agrícolas dieron lugar a la pérdida de los pastizales superficiales que habían ayudado a fijar el suelo y a retener la humedad. Cuando una serie de

sequías golpeó la zona durante la década de 1930, la capa superior del suelo fue arrastrada por el viento, creando el icónico "Dust Bowl" como lo inmortalizó John Steinbeck en las Viñas de la Ira. Se estima que el Dust Bowl cuesta en la región 450.000 millones de dólares por día (en 2018),

dejó a más de medio millón de personas sin hogar, y provocó la pérdida de más de 770 millones de toneladas de tierra vegetal de las llanuras meridionales sólo en 1935. En total, se cree que cada hectárea de tierra agrícola perdió unas 1.000 toneladas de capa superior de suelo.

https://en.wikipedia.org/wiki/Dust_Bowl

<http://kinsleylibrary.info/wp-content/uploads/2014/10/Handi-facts.pdf>

Se cree que la pérdida de materia orgánica del suelo representa una importante amenaza para la productividad agrícola. Las pérdidas de materia orgánica del suelo son particularmente agudas en ciertas partes del mundo, especialmente en aquellas que han sido cultivadas intensivamente. El cultivo del suelo durante décadas en las regiones templadas también dio lugar a una disminución constante de los niveles de materia orgánica del suelo (Schils y otros, 2008). En los climas más cálidos, la degradación de los suelos secos como resultado de la eliminación de la vegetación o del pastoreo excesivo del ganado se denomina "desertificación" y tiene importantes impactos ambientales negativos.

Por qué es importante la materia orgánica del suelo

La fracción orgánica del suelo se deriva de material tanto vegetal como animal que ha sido devuelto al suelo y se encuentra en varias etapas de descomposición. A veces se denomina materia orgánica del suelo (SOM) y otras veces carbono orgánico del suelo (SOC); la diferencia entre ambas definiciones se muestra en el recuadro.

Definiciones		
Carbono del suelo	Carbono orgánico del suelo (SOC)	Materia orgánica del suelo (SOM)
Se trata de la cantidad total de carbono del suelo, e incluye tanto el carbono orgánico (derivado de las plantas y los animales) como el inorgánico (normalmente presente en forma de carbonatos y bicarbonatos).	Este es el carbono presente en formas orgánicas, y se deriva de seres vivos como plantas, animales y microbios.	Es el carbono orgánico del suelo más el hidrógeno, el oxígeno y el nitrógeno que forman parte de los compuestos orgánicos. Los científicos suelen utilizar la siguiente ecuación para convertir SOC en SOM:
MATERIA ORGANICA DEL SUELO (%) = CARBONO ORGANICO DEL SUELO (%) x 1.72		

Índice de gestión del carbono

Este es un método para medir el carbono del suelo y cuán frágil es el carbono, y puede utilizarse para vigilar los cambios en las reservas de carbono del suelo a lo largo del tiempo y si las intervenciones aumentan o disminuyen la SOM (Sodhi *et al.* 2009).

Figura 2 – Las funciones de la materia orgánica del suelo



En todo el mundo, se piensa que la materia orgánica del suelo es un importante depósito de carbono. Estimaciones recientes de la FAO y el ITPS (2018), sugieren que la reserva mundial de carbono orgánico del suelo para la capa superior del mismo (en la parte superior de 0 a 30 cm) es de 680.000 millones de toneladas. Se cree que la cantidad total de carbono en el suelo es mayor que la almacenada tanto en la atmósfera como en la vegetación terrestre combinadas.

Table 1– Reservas mundiales de carbono por zona climática

ZONA CLIMÁTICA	CANTIDAD DE SOC (miles de millones de toneladas)	PORCENTAJE DEL TOTAL
Tropicales	208	31%
Temperatura	191	29%
Boreal	140	21%
Subtropicales	102	15%
Artico	20	3%

Los niveles de carbono orgánico en el suelo varían considerablemente entre las zonas climáticas y el tipo de cobertura de la tierra. En general, se cree que las zonas tropicales son las que contienen la mayor cantidad de carbono orgánico en el suelo (Cuadro 1).

Tabla 2 – Reservas mundiales de carbono por clase de cobertura terrestre

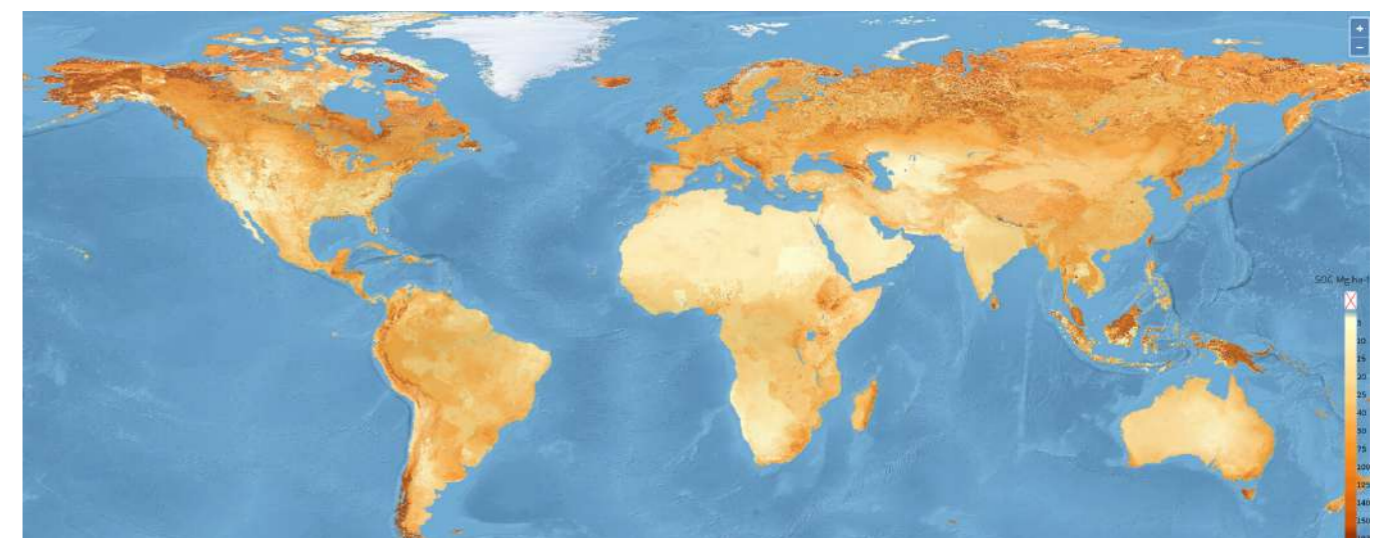
CLASE DE COBERTURA TERRESTRE	CANTIDAD DE SOC (miles de millones de toneladas)	PORCENTAJE DEL TOTAL
Bosques	216	33%
Sabanas y matorrales	197	30%
Tierras de cultivo y pastizales	155	24%
Mosaico de vegetación natural, tierras de cultivo y pastizales	39	6%
Tierras áridas o con escasa vegetación	33	5%
Humedales permanentes	11	2%

En cuanto a la cobertura de la tierra, las zonas forestales son las que tienen el mayor SOC (Tabla 2).

La figura 3 muestra cómo se distribuye el SOC a nivel mundial.

Cabe señalar que las cantidades estimadas que figuran en los Cuadros 2 y 3 no suman 680.000 millones de toneladas debido a las diferencias en las metodologías utilizadas en las distintas zonas climáticas y clases de cobertura terrestre.

Figura 3 – Mapa mundial del carbono orgánico del suelo (Fuente: FAO y ITPS 2018)



La erosión de los suelos puede dar lugar a la degradación del carbono orgánico del suelo, que puede ser liberado como dióxido de carbono o metano; ambos son gases de efecto invernadero. Por lo tanto, la erosión del suelo puede contribuir al cambio climático; mientras que, por el contrario, el aumento de la materia orgánica del suelo puede ayudar a capturar el carbono. Esto se analiza nuevamente con más detalle en el capítulo 5.

La materia orgánica del suelo (SOM) puede dividirse aproximadamente en dos fracciones:

- Una **fracción activa** (que representa entre el 10 y el 40%), y;
- Una **fracción estable** (40-60 %), que se llama "humus" y se forma por un proceso llamado "humificación".

El humus está formado por una compleja mezcla de ácidos húmicos, ácidos fúlvicos y huminos (véase la sección 4.2; cuadro "Humificación y sustancias húmicas").

La rotación del SOM puede variar considerablemente, desde años, décadas, hasta milenios. Se cree que la tasa de rotación del SOM (que influye en el tiempo que permanecerá en el suelo) no sólo se ve influida por su composición química, sino también por la medida en que se une a los minerales, especialmente a las arcillas. Se cree que esto "protege" al SOM de la degradación y se discute más a fondo en la Sección 5. Se piensa ahora que el SOM estable es el producto de la actividad microbiana en el suelo (FAO 2015b).

Es importante señalar que, como se estima que la fracción estable de humus en los suelos tiene una tasa de rotación de entre 20 y 1000 años, una estimación del potencial de secuestro anual sólo para el compost en toda Europa (UE15) sugiere que es del orden de 11 millones de toneladas de dióxido de carbono (CO₂) por año (Van-Camp y otros, 2004). A pesar de que existe una gran incertidumbre en torno a esta estimación, ilustra el importante potencial de secuestro de carbono de la materia orgánica estable y su potencial para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero. Los cambios en el uso de la tierra y los cambios en la cobertura del suelo (LULCC) son también factores importantes que afectan a la dinámica de la formación y descomposición de la materia orgánica del suelo (Victoria et al. 2012). En particular, se ha demostrado que la agricultura reduce la SOM, principalmente debido a las prácticas de arado y cultivo. Scharlemann y otros (2014) observaron que al convertir la vegetación nativa a las tierras de cultivo, se han medido pérdidas de entre el 25 y el 50% de carbono orgánico del suelo en el primer metro. Como tal, se han adoptado una serie de enfoques de gestión en un intento de reducir las

pérdidas de SOM, incluyendo la adición de enmiendas de materia orgánica, como el compost. En la siguiente sección se discute esto con mayor detalle.

En general, hay buenas pruebas que sugieren que la aplicación de materiales orgánicos al suelo aumenta su contenido de materia orgánica. Los experimentos de campo a largo plazo (160 años) en Rothamsted en Inglaterra mostraron aumentos significativos del contenido de SOM tras las aplicaciones anuales de estiércol de granja, especialmente en los primeros años (Powlson et al. 2011; Rothamsted 2018).

Los beneficios de añadir materiales orgánicos, incluido el abono, al suelo son numerosos y dependen de una compleja interacción entre el tipo de suelo, el tipo de materia orgánica, el clima y la forma en que se utiliza la tierra. Los principales beneficios se han resumido en la figura 4 y en el cuadro de texto.

Los beneficios de la aplicación de materia orgánica al suelo

La aplicación regular de materiales orgánicos de calidad al suelo puede dar lugar a los siguientes beneficios físicos, químicos y biológicos:

• Aumento del contenido de materia orgánica del suelo

Esto proviene principalmente de la fracción de humus "estable" en el abono. Esto ayuda a reducir la pérdida de materia orgánica y los efectos de la erosión y mejora la cosecha;

• Aumento de la capacidad de intercambio de cationes

Esto ayuda a unir los nutrientes y a reducir las pérdidas por escorrentía de los fertilizantes inorgánicos;

• Mejora de la retención del agua

Esto ayuda a amortiguar las sequías y es particularmente importante en las partes del mundo que son propensas a la desertificación. También ayuda a reducir las inundaciones durante los episodios de clima húmedo, ya que mejora la capacidad del suelo para retener el agua;

• Esto ayuda a reducir la variabilidad de la temperatura del suelo

Esto ayuda a reducir la variabilidad de las temperaturas extremas, lo que es beneficioso para los organismos del suelo y los cultivos;

• Aumento de la actividad biológica

Se han observado aumentos tanto de la micro como de la macrofauna, debido, en parte, a la mejora de la estructura física del suelo, pero también al aumento de la disponibilidad de carbono y nutrientes para la alimentación y el crecimiento.

Esto tiene efectos beneficiosos adicionales, ya que ayuda a mejorar el ciclo de los nutrientes y la disponibilidad de los cultivos para su absorción.

• Supresión de los patógenos de las plantas

Hay buenas pruebas de que algunos abonos pueden ayudar a suprimir el crecimiento de algunos fitopatógenos. Aunque los mecanismos para lograrlo son complejos, se han documentado notables disminuciones de patógenos de importancia comercial, como *Fusarium oxysporum* y *Pythium spp.*

• Aumento del pH del suelo (efecto de cal)

El compost puede reducir la acidez de los suelos, lo que ayuda a liberar micronutrientes, poniéndolos a disposición de las plantas.



Figura 4 – Los beneficios de añadir enmiendas orgánicas al suelo (Adaptado de Diacono & Montemurro, 2010)

Figura 5 – Flujo esquemático simplificado de materia orgánica en el suelo utilizado en el modelo CQESTR

Tras la aplicación de la materia orgánica al suelo, se cree que los compuestos orgánicos se descomponen a diferentes velocidades. El modelo de suelo CQESTR, desarrollado en los EE.UU., asume que hay, en general, tres fases de descomposición:

Fase I

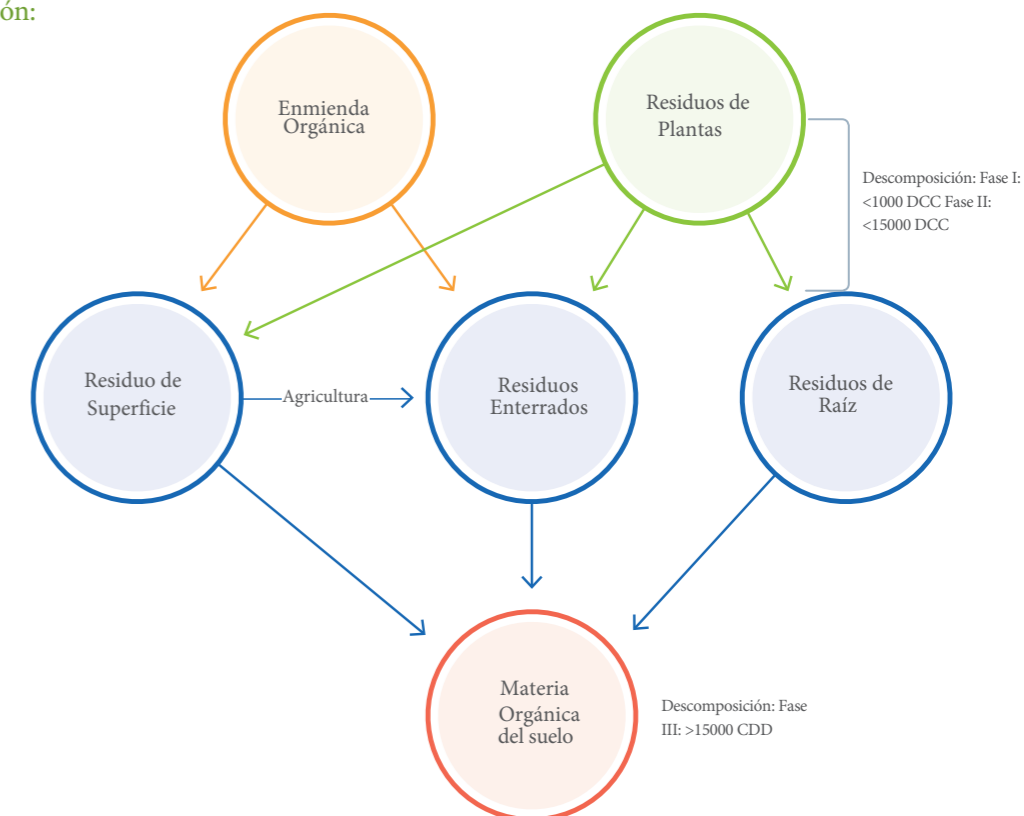
La rápida descomposición (se produce a corto plazo; menos de 1.000 CDD²);

Fase II

Descomposición lenta, en la que se degradan los compuestos más estables (se produce a medio plazo; menos de 15.000 CDD); y

Fase III

Transferencia de materia orgánica al fondo de materia orgánica del suelo estable (a largo plazo; más de 15.000 CDD).



El modelo CQESTR

Este es un modelo desarrollado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos - Servicio de Investigación Agrícola (USDA-ARS). Calcula las tasas de descomposición biológica de los residuos de los cultivos o de las enmiendas orgánicas a medida que se convierten en materia orgánica del suelo o en carbono orgánico del suelo.

Puede utilizarse para evaluar el efecto de las prácticas de ordenación agrícola, incluida la adición de abono, en la dinámica de la SOM a corto y largo plazo.

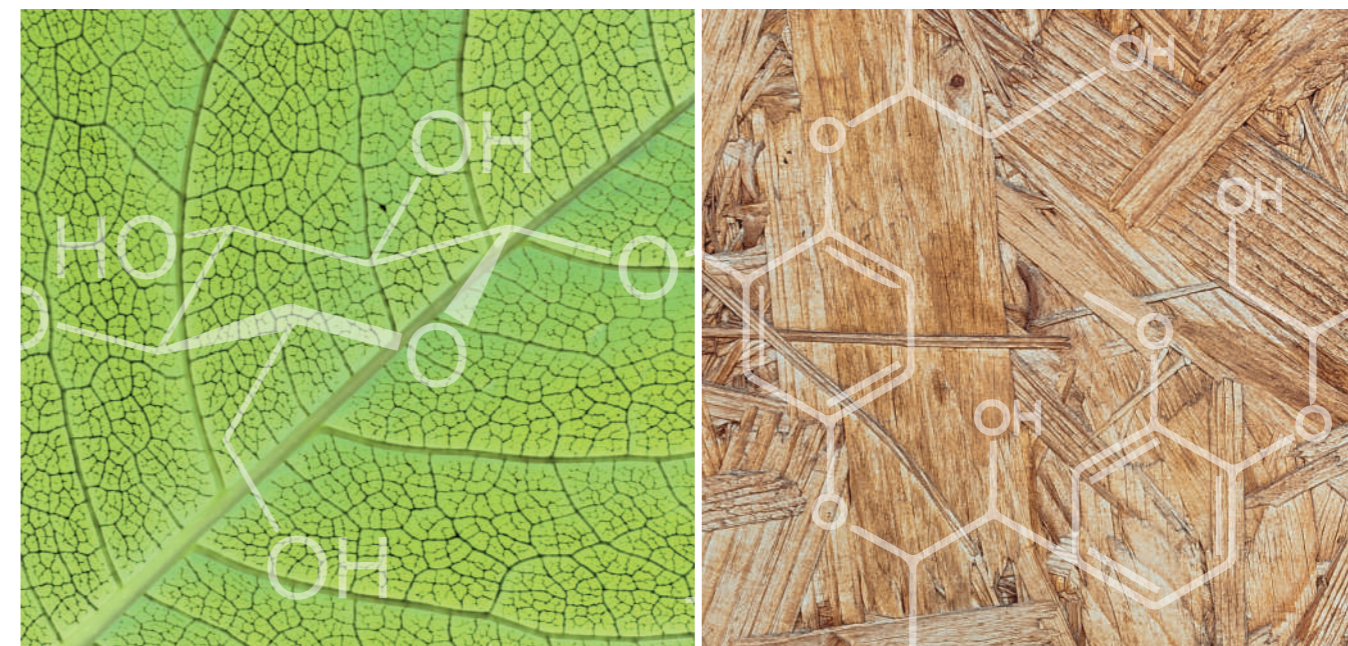
<https://www.ars.usda.gov/pacific-west-area/pendleton/swcr/docs/cqestr/>

²DCC se refiere al "día de grados acumulados", o tiempo térmico, y es una medida de cuántos grados por encima de 0 °C se multiplica el suelo por el número de días.

Transformaciones de los residuos orgánicos putrescibles durante el tratamiento biológico

Transformaciones de los residuos orgánicos putrescibles

- Los residuos orgánicos putrescibles están compuestos por una variedad de compuestos orgánicos, de los cuales la celulosa es el principal constituyente químico de la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales, seguido de la lignina y la hemicelulosa.
- Una diversa gama de microorganismos son responsables de la biodegradación de los residuos orgánicos putrescibles. Las bacterias dominan en los sistemas de digestión anaeróbica, mientras que tanto las bacterias como los hongos son fundamentales para el proceso de compostaje.
- La lignina, que es el componente estructural de la madera, sólo se degrada en ambientes aeróbicos (que contienen oxígeno) y por la acción de algunos hongos y ciertos tipos de bacterias llamadas actinomicetos.
- Durante el compostaje se produce un proceso denominado humificación, que da lugar a la formación de materia orgánica estable cuando se aplica al suelo.
- Hay pocas pruebas científicas de que se produzca una humificación durante la digestión anaeróbica, lo que refleja tanto el proceso como las propiedades de los residuos descompuestos.



4.1

Composición de los residuos orgánicos putrescibles

Antes de discutir lo que sucede durante la digestión anaeróbica (DA) y los procesos de compostaje, vale la pena resumir brevemente los principales componentes químicos presentes en los residuos orgánicos putrescibles ya que son estos compuestos

que se transforman durante el tratamiento para ayudar a sostener la actividad microbiana y crear productos.

En general, se piensa que la celulosa es el principal constituyente químico de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (RSU), seguido de la lignina y la hemicelulosa (Komilis & Ham 2003)

Aunque los residuos orgánicos putrescibles varían considerablemente en cuanto a su origen, contienen en general los principales componentes enumerados en el cuadro

3. La excepción clave aquí es la lignina, que forma el componente duro-estructural de la madera, y sólo se biodegrada en ambientes aeróbicos (que contienen oxígeno), como durante el compostaje. Esta diferencia es importante, ya que afecta al tipo y las propiedades de la materia orgánica en el compost y el digestato

Tabla 3 – Principales componentes de los residuos orgánicos putrescibles (derivados de Hubbe 2014)

Componente	Descripción
Lignina	<ul style="list-style-type: none"> • Un polímero complejo que forma el componente estructural de la madera • Principalmente presente en los residuos verdes leñosos. • Se degrada lentamente durante el compostaje • No se degrada generalmente de forma anaeróbica
Celulosa	<ul style="list-style-type: none"> • Un polímero de glucosa, presente en las plantas (tanto en los alimentos como en los residuos verdes) • Una buena fuente de energía y se degrada fácilmente durante el compostaje y la digestión Anaeróbica DA • Fuente de energía
Hemicelulosa	<ul style="list-style-type: none"> • Un polímero de glucosa y algunos otros azúcares presentes en las plantas (tanto en los alimentos como en los residuos verdes) • Una buena fuente de energía y se degrada fácilmente durante el compostaje y la DA
Proteínas	<ul style="list-style-type: none"> • Moléculas ricas en nitrógeno • Incluye componentes celulares y enzimas • Se degrada rápidamente durante el compostaje y DA; una buena fuente de nitrógeno • Particularmente predominante en los restos de alimentos
Carbohidratos	<ul style="list-style-type: none"> • Azúcares y polisacáridos • Una buena fuente de energía y se degrada fácilmente durante el compostaje y la DA
Lípidos	<ul style="list-style-type: none"> • Las grasas y los aceites, presentes como compuestos de almacenamiento y como componentes de las células • Se degradó rápidamente durante el compostaje y la Digestión Anaeróbica; una buena fuente de energía • Particularmente predominante en los restos de alimentos

El papel de los microorganismos

Tanto la digestión anaeróbica como el compostaje son realizados por una serie de diferentes microorganismos (microbios); se resumen en el cuadro 4. Los microbios son organismos unicelulares, capaces de vivir por sí mismos. Se alimentan mediante la secreción de enzimas fuera de sus células y en el medio ambiente circundante;

estas enzimas luego digieren las materias primas, lo que permite a los microbios consumir los productos de la descomposición como alimento.

Otras transformaciones químicas importantes también se producen por la acción de las

enzimas microbianas extracelulares. La humificación es un proceso importante, que implica la transformación química de la lignina en compuestos estables de carbono que se denominan colectivamente humus (véase el cuadro de texto).

Tabla 4 – Los principales tipos de microorganismos que intervienen en el tratamiento de los residuos orgánicos putrescibles.

Micro organismo	Descripción
Bacteria	Estos son organismos unicelulares microscópicos que tienen una estructura celular primitiva. Se encuentran en todo el mundo en una diversa gama de hábitats, incluyendo el intestino humano, los océanos profundos y el suelo. Las bacterias son fundamentales en los procesos de compostaje y digestión anaeróbica, aunque los tipos y formas en que degradan los residuos orgánicos putrescibles difieren. En términos generales, las bacterias pueden clasificarse como: Aeróbicos - estos requieren oxígeno para descomponer las materias primas, creando nuevas células y subproductos metabólicos, así como liberando dióxido de carbono, agua y calor. Anaeróbicos - requieren ambientes libres de oxígeno para descomponer las materias primas, creando nuevas células y subproductos metabólicos, así como liberando dióxido de carbono, agua y generalmente metano.
Actinomicetos	Estas son una subclase de bacterias que pueden formar filamentos. Son particularmente importantes durante el proceso de compostaje, ya que algunas pueden soportar altas temperaturas y son capaces de degradar parcialmente la lignina.
Hongos	Se trata de un grupo de organismos multicelulares que son los principales responsables del reciclado de nutrientes a nivel mundial e incluyen tanto hongos como levaduras. Al igual que las bacterias, se encuentran en todo el mundo; sin embargo, la mayoría son incapaces de tolerar las altas temperaturas o los entornos extremos (a diferencia de algunas bacterias). Los hongos son los principales descomponedores de la lignina y, por lo tanto, son fundamentales para la degradación y transformación de los residuos leñosos. Los hongos de la descomposición de la madera pueden clasificarse según el tipo de descomposición que causan. Entre los hongos de la podredumbre de la madera, se cree que los hongos de podredumbre blanca son los principales degradadores de lignina en el medio ambiente, aunque también se cree que los hongos de podredumbre marrón y de podredumbre blanda desempeñan importantes funciones. Los hongos están presentes durante el compostaje, pero no se cree que sean significativos en los sistemas comerciales de DA.
Los microorganismos suelen clasificarse según los rangos de temperatura en los que prefieren crecer: Mesofílico - Estos son microorganismos donde la temperatura óptima para el crecimiento está entre 20-45 °C (ambientes cálidos) Termofílico - Estos son microorganismos donde la temperatura óptima para el crecimiento está entre 45 - 80 °C (ambientes cálidos)	

Humificación y sustancias húmicas

La humificación es el proceso de formación de **sustancias húmicas** a partir de residuos orgánicos putrescibles. Implica una compleja serie de procesos bioquímicos y se produce en los suelos y durante el proceso de compostaje. Se cree que

Se cree que las partes leñosas de las plantas (tanto la **lignina** como la **celulosa** y la **hemicelulosa**) son los precursores de las **sustancias húmicas**. Se lleva a cabo generalmente por **hongos** (como las especies de podredumbre blanca y marrón), aunque algunas bacterias (especialmente los **actinomicetos**) también pueden estar involucradas.

Las sustancias húmicas son compuestos orgánicos complejos que están ampliamente mal definidos; sin embargo, se clasifican en uno de los tres tipos en función de sus propiedades (Aiken et al. 1985):

- **Húmina (HU)** - no es soluble en agua a ningún pH, y es muy estable, permaneciendo en los suelos durante muchos años;
- **Ácidos húmicos (HA)** - no son solubles en agua en condiciones ácidas, y son moderadamente estables en el suelo; y
- **Ácidos fúlvicos (FA)** - Son solubles en el agua en todas las condiciones de pH y son las menos estables de las sustancias húmicas, teniendo una tasa de renovación más rápida en el suelo que los HU y HA.

La humificación se produce durante el proceso de compostaje, y la medida en que se ha producido proporciona una indicación de la madurez del compost. Algunos investigadores utilizan un **Índice de Humificación (HI)** para describir la madurez del compost:

Índice de Humificación (HI) = Relación entre la concentración de ácidos húmicos y ácidos fúlvicos (CHA/CFA) expresada como porcentaje del carbono orgánico total

Las sustancias húmicas son la principal fuente de carbono estable en el suelo.

En términos generales, los microbios pueden clasificarse como **anaeróbicos** (lo que significa que pueden vivir y crecer en ausencia de oxígeno) o **aeróbicos** (lo que significa que necesitan oxígeno para vivir y crecer). Los componentes enumerados en la Tabla 3 pueden ser degradados por

microbios tanto anaeróbicos como aeróbicos, con la excepción de la lignina, que requiere oxígeno.

Tanto la DA como el compostaje son ambientes dinámicos que resultan en una sucesión de diferentes poblaciones microbianas durante

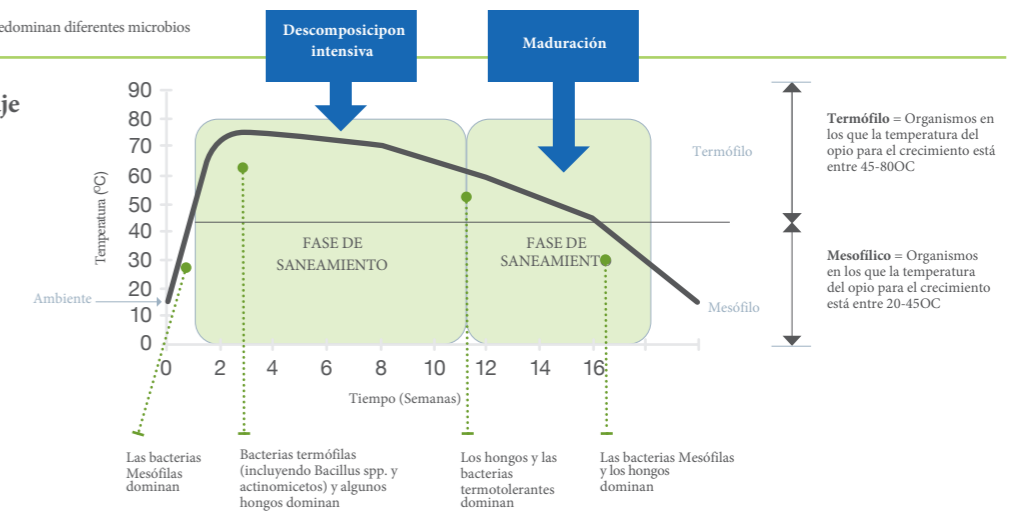
los respectivos procesos a medida que se asimilan los distintos componentes de las materias primas (Tiquia *et al.* 2002). Estos se resumen a continuación.

4.3

En las diferentes etapas del proceso predominan diferentes microbios

Figura 6 – Etapas del compostaje

La microbiología y la bioquímica del compostaje es compleja e implica comunidades microbianas bacterianas y fúngicas que coexisten entre sí. En general, el compostaje se ha caracterizado menos que la digestión anaeróbica, y las principales fases de compostaje se han descrito en términos físicos, utilizando la temperatura como indicador de progreso (Figura 6), aunque se piensa que la degradación sigue un modelo cinético de primer orden (Hamoda y otros, 1998).



Inicialmente, la temperatura de la materia prima de compostaje está en el rango mesofílico (por debajo de 45 °C). Las bacterias dominan durante esta fase (Albrecht et al. 2010), descomponiendo los compuestos fácilmente degradables, incluidos los ácidos orgánicos (lo que a menudo hace que el PH baje) También se libera energía térmica, lo que hace que la temperatura aumente.

Este aumento significa que sólo los microbios capaces de tolerar o prosperar a temperaturas más altas sobreviven. Se trata principalmente de especies de hongos termófilos y actinomicetos (Hubbe *et al.* 2010). La sofisticada secuenciación del ADN ha demostrado que diferentes comunidades de microbios dominan en diferentes etapas del proceso, con un cambio de bacterias a hongos a medida que el abono madura (Hubbe 2014).

Se cree que la celulosa y la hemicelulosa son las principales fuentes de energía y se metabolizan en el proceso de compostaje. Las investigaciones han demostrado que casi toda la hemicelulosa se degrada durante el compostaje, observándose reducciones de celulosa de entre el 54 y el 91% (Komilis y Ham 2003).

‘La celulosa es la principal fuente de energía, la lignina es la base del humus.

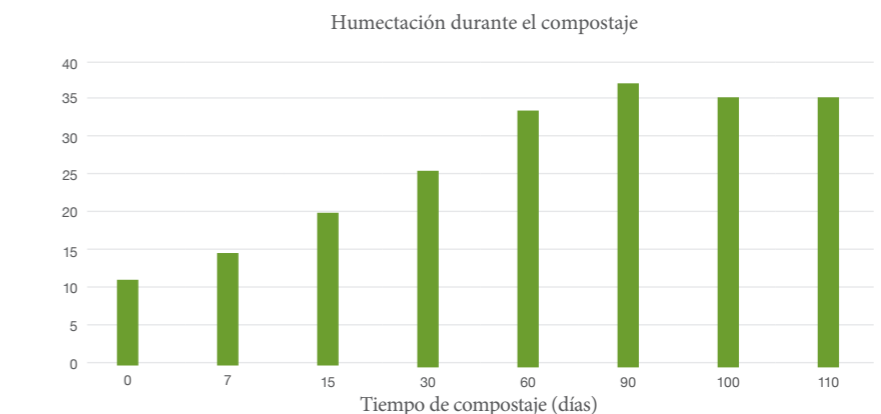
A medida que aumenta la temperatura, dominan los hongos termófilos y los actinomicetos, que son responsables de la degradación parcial de la lignina. Son los productos de la degradación de la lignina los que se transforman en sustancias húmicas, a través de una serie de reacciones complejas.

Las investigaciones demostraron que la adición de lignina a las materias primas para el compostaje puede aumentar la formación de ácido húmico (Smidt *et al.* 2008).

En general, el abono inmaduro (fresco) tiende a tener una alta concentración de ácidos fúlvicos (FAs) en relación con los ácidos húmicos (HAs). A medida que el abono madura, la concentración de FAs permanece igual o disminuye, pero el nivel de HAs aumenta (Tuomela et al. 2000). Este cambio en las concentraciones relativas puede expresarse como un Índice de Humificación (véase el recuadro).

Se demostró que el HI aumenta durante el compostaje (Figura 7). Esto significa que a medida que el compostaje progresa, los compuestos húmicos aumentan en complejidad estructural, lo cual es un factor importante cuando se aplican al suelo. Por lo tanto, la concentración relativa de ácidos húmicos es un indicador de la madurez del compost.

Figura 7 – Aumento del índice de humectación durante el compostaje (Redactado en base a los datos publicados por Tejada *et al.* 2009)



³ Sin embargo, también hay una nota de precaución: Binner *et al.* (2011) también encontraron que el digestato producido en un fermentador optimizado para la producción de gas no era tan efectivo en la producción de sustancias húmicas cuando se poscomponía, en comparación con el digestato producido después de un tiempo de retención más corto. Se pensó que esto se debía a la ausencia de compuestos orgánicos necesarios para la formación de ácido húmico.

Digestión Anaeróbica

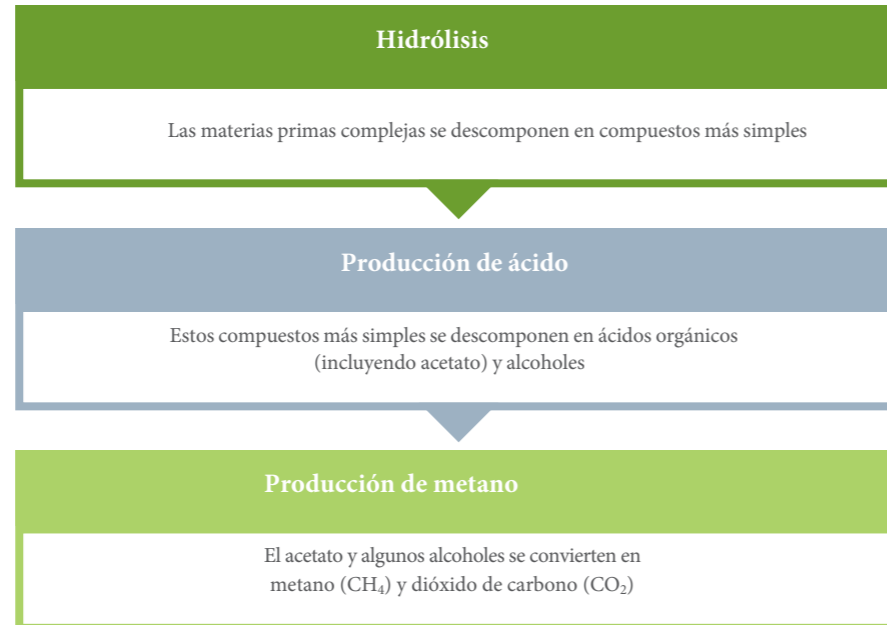
En muchos aspectos, la microbiología y la bioquímica de la digestión anaeróbica se comprende mejor que la del compostaje. La DA se basa principalmente en las bacterias que prosperan en un ambiente libre de oxígeno. En general, hay tres etapas principales que intervienen en la degradación de las materias primas y en la producción de metano (véase la figura 8).

Se cree que en algún lugar entre el 20 y el 95% del carbono de la materia prima se convierte en metano y dióxido en el proceso de la digestión anaeróbica, con más del 90% de los ácidos grasos volátiles, más del 80% de la hemicelulosa, más del 50% de la celulosa y las proteínas degradadas (Möller, 2015). Cabe destacar que la lignina no se degrada de forma anaeróbica, por lo que los residuos verdes no suelen ser una materia prima adecuada para los procesos de DA.

Hay pocas pruebas científicas de humificación durante la digestión anaeróbica; más bien, se ha demostrado que el proceso de DA degrada tanto los ácidos húmicos como los fúlvicos a tasas más rápidas que las de su formación

(Li et al. 2017 & Marcato et al. 2009). Después de la DA, cualquier materia prima parcialmente degradada, la biomasa microbiana y los compuestos no degradados permanecen como digeridos. Por lo tanto, se cree que cualquier compuesto de carbono estable en el digestato se ha concentrado debido a la pérdida de masa durante el proceso de AD, en lugar de formarse per se.

Figura 8 – Las principales etapas del proceso de la digestión anaeróbica



Los beneficios de las enmiendas de materia orgánica para el suelo

LOS BENEFICIOS DE LAS ENMIENDAS DE MATERIA ORGÁNICA

- El compost puede clasificarse como un mejorador de suelos orgánicos, ya que contribuye al contenido de materia orgánica del suelo.
- Los digestatos pueden clasificarse como un fertilizante orgánico, ya que su principal función es suministrar nutrientes a las plantas.
- Cuando los residuos orgánicos putrescibles se convierten en compost, en lugar de aplicarlos directamente, quedan mayores cantidades de carbono en el suelo.
- La materia orgánica del compost se transforma aún más a través de los microbios del suelo en formas más estables de carbono en el suelo.
- El compost tiene el potencial de retener o capturar carbono en el suelo:
 - Existen estudios que demuestran que en un período de 4 a 12 años entre el 11% y el 45% del carbono orgánico aplicado al suelo como compost permaneció como carbono orgánico del suelo.
 - Es posible que el carbono orgánico del suelo aumente entre 50-70 kg C ha⁻¹ año⁻¹ t⁻¹ de sólidos secos aplicados como compost.
 - Cada tonelada de carbono orgánico del suelo contiene el equivalente a unas 3,67 toneladas de dióxido de carbono atmosférico.
 - 1 tonelada (masa fresca) de residuos verdes derivados del compost aplicado al suelo en más de una hectárea (10.000 metros cuadrados) resulta en un ahorro neto de CO₂-eq de 143 kg ha⁻¹ año⁻¹ debido al aumento de la materia orgánica del suelo solamente.
 - Los principales beneficios para los suelos se realizan en los primeros 20 años hasta que se alcanza un nuevo equilibrio de materia orgánica.
- La aplicación repetida de compost aumenta la estabilidad de los agregados y los poros del suelo, reduce la compactación y aumenta la capacidad de retención de agua.
- Se demostró que la aplicación de compost al suelo aumenta la biomasa microbiana del suelo y la actividad microbiana, y crea una reserva de nutrientes para las plantas.
- Los beneficios a largo plazo para el suelo del digestato anaeróbico son menos claros que los del compost, y se cree que a largo plazo tiene un efecto insignificante sobre la materia orgánica del suelo.
- Se estima que el aumento de la actividad microbiana del suelo se produce tras la aplicación del digestato.
- El importante beneficio de aplicar el digestato al suelo se debe a su alto contenido de nutrientes.

La sección 3 estableció la importancia del suelo y su contenido de materia orgánica. Esta sección resume la investigación que evalúa el impacto de la adición de enmiendas de materia orgánica, como el compost y el digestato, al suelo. Es objeto de un gran escrutinio científico, por lo que nos hemos esforzado en resumirlo en un formato fácil de leer sin comprometer la integridad académica.

Clasificación de las enmiendas orgánicas

El compost y el digestato anaeróbico difieren en su composición química, lo que se debe a los diferentes tipos de materias primas de las que se han derivado (en particular, si contienen lignina o no) y a los propios procesos de tratamiento biológico (es decir, si se trata de un proceso aeróbico y/o anaeróbico). La combinación de estos dos factores significa que tanto el compost como el digestato difieren en los niveles de sustancias húmicas y en el tipo y la disponibilidad de nutrientes vegetales que contienen. Estas diferencias afectan, por lo tanto, a la forma en que estas enmiendas orgánicas se comportan cuando se aplican al suelo.

Veeken y otros (2017) examinaron los datos bioquímicos obtenidos a partir de una serie de enmiendas orgánicas, entre ellas el compost, el digestato, los abonos y los purines de granja. Los autores distinguieron entre los insumos orgánicos que contribuyen al contenido de materia orgánica de un suelo y los que son principalmente fertilizantes (debido a su contenido de nutrientes).

Utilizaron el término "materia orgánica efectiva" (MOE), que definieron como "la materia orgánica que sigue estando disponible después de un año de su incorporación al suelo". El porcentaje restante de materia orgánica también se denomina materia orgánica humificada (residual)".

El MOE se calculó sobre la base del contenido de materia orgánica y el coeficiente de humidificación (HC, por sus siglas en inglés), donde el HC se definió como la fracción de materia orgánica efectiva en relación con la materia orgánica total. A continuación se calculó la relación entre el MOE y tanto el nitrógeno mineral como el fósforo para las diferentes enmiendas orgánicas y se trazó en un gráfico (Figura 9).

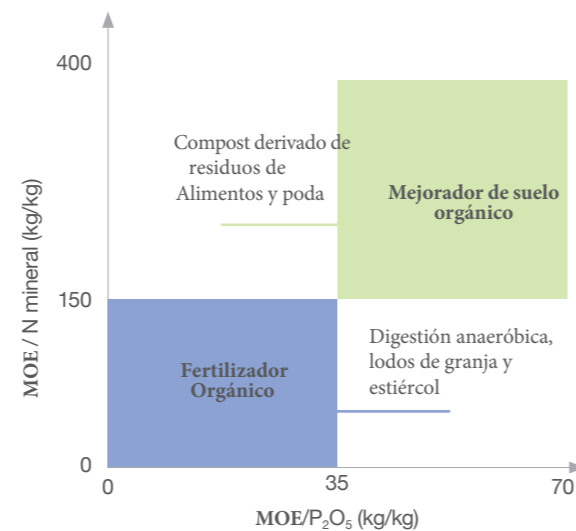
Sugirieron lo siguiente

- "Un mejorador de suelo orgánico debe contener un alto nivel de MOE para contribuir a la materia orgánica del suelo y debe ser bajo en nutrientes, ya que no es un fertilizante; y
- Para un fertilizante orgánico es al revés: alto en nutrientes y bajo en MOE".

Sobre la base de esta clasificación y con el fin de cuantificar los beneficios para el suelo:

- El compost se puede clasificar como un mejorador orgánico de suelos; y
- Los digestatos pueden clasificarse como un fertilizante orgánico.

Figura 9 – Clasificación de las enmiendas orgánicas como mejorador de suelo orgánico o fertilizante orgánico basado en la relación entre el MOE y los nutrientes (N & P) (extraído de Veeken *et al.* 2017)



Los beneficios de aplicar compost al suelo

5.2.1 El contenido de materia orgánica del suelo

En varios estudios se han comunicado los beneficios para los suelos de las adiciones de compost a lo largo de períodos de años, algunos de los cuales se resumen en el cuadro 5.

Tabla 5 – Resumen de los estudios seleccionados que demuestran los efectos beneficiosos de la aplicación de compost al suelo

Tipo de Compost	Tipo de Suelo / Sistema de cultivo	Tiempo Período	Efecto/s Observados	Referencia
Compost de paja de arroz	Cultivo de arroz y trigo	10 años	Aumento del total de SOC (~29%) y del carbono lábil después de tasas de aplicación de 4 y 16 toneladas / ha / año en comparación con el control. Los autores observaron que el aumento del contenido de carbono en forma lábil afectaba al diámetro del peso medio del suelo, lo que es una indicación de la estabilidad de los agregados del suelo.	Sodhi <i>et al.</i> 2009
No se indica	Entisol en la Turquía mediterránea Aplicación anual de compost al suelo justo antes de la siembra de los cultivos durante el período 1996 y 2010	14 años	La aplicación de compost de 25 toneladas / año resultó en un aumento de SOC de 7,49 toneladas / ha en el período de 14 años a través del horizonte de 0-0,30 cm y un total de N del suelo de 0,29 Mg ha-1.	Ortas <i>et al.</i> 2013
Compost de residuos lácteos	No se indica	5 años	El grupo C fue mejorado en un 115%. Se calculó que el carbono almacenado en la materia orgánica del suelo representaba alrededor del 11% de la cantidad total de C aplicada.	Quoted in: Diacono & Montemurro 2010
Alimentos y compost derivado de la lignocelulosa	Arcilla silíceo (Italia) cultivada con maíz	6 meses (150 días)	El compostaje se aplicó a dos tasas: • 50 toneladas / ha • 85 toneladas / ha Tasas de secuestro de carbono entre 617 - 623 g C / kg de compost. 40% - 53% del total de carbono añadido fue retenido en el suelo. Respuesta lineal entre la tasa de aplicación y la degradación y retención de C. El carbono lábil sugerido se mineralizó rápidamente.	Adani <i>et al.</i> 2009
Compostaje de desperdicios de algas y peces	Cambisol húmico (invernadero)	110 días	El compost se añade al suelo a dos velocidades: 30,5 y 50,84 g de compost seco / kg de suelo. Se observaron dos tasas de mineralización C, cada una con diferentes constantes de tasa: • El 20% estaba en una forma fácilmente disponible (k = 0,029) • El 80% se mineralizó lentamente (k = 0,005)	Illera-Vives <i>et al.</i> 2015
Compost de residuos verdes, compost de residuos de verduras, frutas y jardines, y compost de hongos.	Marga arenosa	21 semanas	Sólo entre el 1,8% y el 8,8% de la C se mineralizó al final del experimento.	De Neve <i>et al.</i> 2003
Residuos de cultivos, estiércol y compost de fertilizantes de fosfato	Argissolo amarelo (huerto de cítricos en el norte de Brasil)	16 meses	Aumento del SOC en 0-0,15 m de profundidad del 37%. La adición de fertilizantes minerales aumentó la tasa de descomposición del SOM.	Moura <i>et al.</i> 2017
Compost de residuos verdes	Dos sitios experimentales en el Reino Unido: arenoso/ ligero y medio (pesado)	9 años	Aumento del contenido de SOM en ~24% (equivalente a 8-10 t/ha adicionales de SOM en la capa superior del suelo) en comparación con el control cuando se aplicó el abono de desechos verdes a una tasa de carga total de 47-49 t de materia orgánica/ha durante el período de prueba. Este fue un incremento de SOM similar al observado para el estiércol de granja durante 20 años.	Bhogal <i>et al.</i> 2016
Compost de estiércol de aves de corral	Dos tipos de suelo: limoso y arcilloso limoso.	19 años	Se aplicó el compost en una dosis de 4 t / ha antes de la siembra con el cultivo de cobertura de maíz/invierno seguido de rotaciones de cultivo de cobertura de tomate/invierno en años alternos. Aumento de las existencias de SOC de: • 5,31 toneladas C/hectárea en la capa de 0-15 cm; y • 2,59 toneladas C / hectárea en la capa de 15-30 cm • 21,8 toneladas C / hectárea a través de la capa de 0-200 cm También se observaron incrementos en la SOC en los 30-200 cm posteriores, lo que no se observó con otros tratamientos. Aumento de SOC debido al abono y al cultivo de cobertura de invierno.	Tautges <i>et al.</i> 2019

Además, las siguientes publicaciones también resumen los aumentos medidos del contenido de materia orgánica del suelo tras las aplicaciones repetidas de enmiendas orgánicas:

- Efectos beneficiosos de la aplicación del compost en la fertilidad y la productividad de los suelos (Amlinger *et al.* 2007);
- Aplicación sostenible del compost en la agricultura (ECN 2017); y
- Estudio de caso de investigación de la Asociación de Biología del Petróleo y Salud del Suelo - Prueba del efecto de las adiciones de material orgánico en la salud del suelo (AHDB 2019).

En general, las pruebas sugieren que una mayor cantidad de carbono permanece en el suelo cuando los residuos orgánicos putrescibles se convierten en abono, en lugar de aplicarse directamente. Por ejemplo, en un experimento en el que se comparan los efectos del abono lácteo crudo y el abono compostado sobre el carbono del suelo, el 36% del carbono aplicado en el compost permaneció en el suelo después de cuatro años, en comparación con el 25% del carbono del abono (Eghball 2002). También se cree que el compost maduro es mejor para aumentar los niveles de materia orgánica del suelo que el abono fresco, ya que una mayor concentración de carbono estable (Aduña 2016). Esto también fue observado por investigadores del Reino Unido (Bhagal *et al.* 2016), quienes supervisaron el efecto de diferentes residuos orgánicos putrescibles en la fracción de materia orgánica ligera (LFOM) del suelo. Comprobaron que la aplicación de abono aumentaba el LFOM, aunque no se observó un aumento similar tras la aplicación de materiales

orgánicos líquidos (digestato anaeróbico y estiércol de ganado).

En un documento reciente, Tautges y otros (2019) demostraron que la aplicación de abono orgánico junto con los cultivos de cobertura de invierno aumentaba considerablemente el contenido de carbono orgánico del suelo en el horizonte de 0 a 200 cm en un período de 19 años. Este aumento no se observó sólo con los fertilizantes convencionales y los cultivos de cubierta de invierno, lo que sugiere que el compost fue el responsable de los aumentos de la SOC, especialmente en las capas más profundas del suelo (60-200 cm). Sin embargo, este aumento de la SOC en las capas más profundas del suelo es importante para el almacenamiento de carbono.

Se cree que la madurez del abono y las materias primas de las que se deriva influyen en el tipo y las proporciones de las sustancias húmicas que contiene. Una vez aplicadas al suelo, se convierten en formas más estables por la acción de los microbios del suelo. Las investigaciones han sugerido que los ácidos húmicos del compost se encuentran en la llamada "neoformación", y cuando se añaden al suelo, pueden incorporarse a la estructura de ácidos húmicos del suelo (Velasco *et al.* 2004).

Después de la aplicación del compost al suelo, los investigadores rastrearon la incorporación de carbono en el compost a la fracción húmica estable del suelo. En particular, el contenido de humus aumentó a medida que la tasa de aplicación del compost se incrementó (Lima *et al.* 2010).

"La materia orgánica en el compost se transforma aún a través de los microbios del suelo en formas más estables de carbono en el suelo"

En un examen exhaustivo de los efectos a largo plazo de las enmiendas orgánicas en la fertilidad del suelo realizado por Diacono y Montemurro (2010) se llegó a la conclusión de que

"La aplicación prolongada de enmiendas orgánicas incrementó el carbono orgánico [del suelo] hasta un 90% frente al suelo no fertilizado, y hasta un 100% frente a los tratamientos con fertilizantes químicos".

Los beneficios de captación de carbono en el suelo para mitigar el cambio climático fueron examinados por Powlson y otros (2011). Los autores sugirieron que el beneficio neto de la aplicación de residuos orgánicos putrescibles al suelo dependía de su destino alternativo. Señalaron que si "el método de eliminación alternativo es la quema, la aplicación a un suelo en el que se retenga al menos parte del residuo C será una mejora desde el punto de vista de la mitigación del cambio climático. Del mismo modo, si la alternativa es la eliminación en lugar de los rellenos sanitarios, la aplicación del suelo será generalmente beneficiosa". Citan el ejemplo del abono de residuos verdes, donde la eliminación y posterior descomposición en un relleno sanitario resultará en la generación de metano. A menos que el metano sea capturado y utilizado como fuente de energía "la aplicación a la tierra representará una 'emisión evitada' de metano". Además de un grado de secuestro de C del suelo, factores como el tipo de suelo, las condiciones climáticas, las prácticas de ordenación de la tierra y la arcilla del suelo, así como el grado de humidificación de las enmiendas orgánicas, influyen en la velocidad a la que la materia orgánica se descompone o se transforma en formas más estables cuando se aplica al suelo (Torri *et al.* 2014 & Schmidt *et al.* 2011). Esto hace que las estimaciones del potencial de captura de carbono sean muy difíciles. Además, la obtención de datos de los trabajos científicos es problemática, ya que los autores no siempre indican: el tipo o la estabilidad/ madurez del compost; la profundidad del suelo; o si el compost se esparció en la superficie o se labraron las capas superficiales. Este último punto es importante, ya que la incorporación al suelo puede afectar a la tasa de oxidación superficial o a la complejación con componentes inorgánicos, como los minerales de arcilla, en el suelo.

Se cree que el carbono en el compost se mineraliza a dos tasas diferentes, cada una con su propia constante de tasa de decaimiento (Adani *et al.* 2009, Illera-Vives *et al.* 2015 y Pedra *et al.* 2007). Se cree que:

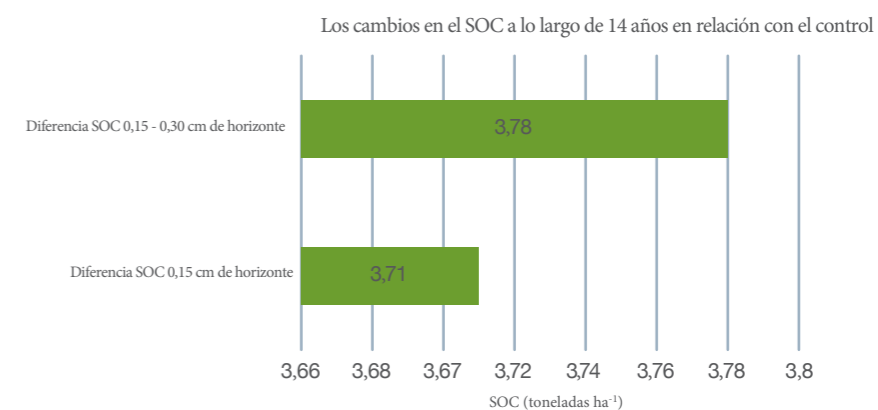
- Hay una fracción fácilmente degradable (con una estimación de alrededor del 20%) que decae rápidamente después de una cinética exponencial; y
- Una fracción más estable que se mineraliza lentamente, descomponiéndose linealmente.

En general, se cree que la tasa de mineralización es más alta durante los primeros días después de la aplicación al suelo, que luego disminuye hasta alcanzar una tasa estable.

Los experimentos publicados por varios investigadores también demuestran que se retiene más carbono en el suelo cuando los residuos orgánicos putrescibles se convierten en abono en lugar de aplicarse directamente sin tratamiento aeróbico (por ejemplo, abono de ganado compostado frente a estiércol crudo); véanse, por ejemplo, Eghball (2002), Powlson y otros (2012), Bhagal y otros (2016) y Peltre y otros (2017). Esto se debe a los mayores niveles de humidificación que se forman durante el compostaje, y a la descomposición y posterior pérdida de los compuestos de carbono más volátiles durante el procesamiento.

No obstante, se han medido los aumentos de los niveles de carbono orgánico del suelo tras la aplicación de abono, como se muestra en el ejemplo de la figura 10.

Figura 10 – Aumentos de SOM medidos después de la adición de abono a lo largo de 14 años (basado en los datos publicados por Ortas *et al.* 2013)



5.2.2 Potencial de secuestro de carbono

Actualmente existe un gran interés en el potencial de los suelos para capturar carbono y, por lo tanto, para ayudar a mitigar el cambio climático, y hay una serie de buenas fuentes de información que lo resumen bien, entre ellas

- El **Proyecto Climsoil de la Comisión Europea** (http://ec.europa.eu/environment/soil/review_en.htm); y
- El **Portal del suelo de la FAO** (<http://www.fao.org/soils-portal/en/>)

Captura de carbono en el suelo

La captura de carbono (C) del suelo puede definirse como **cualquier aumento persistente de carbono orgánico del suelo originado por la eliminación de dióxido de carbono de la atmósfera** (Torri *et al.* 2014). La capacidad de captura de C del suelo es, por lo tanto, una función de la capacidad del suelo para retener y estabilizar el carbono.

La humificación de los residuos orgánicos putrescibles es una de las formas en que se puede capturar el carbono en el suelo, aunque también pueden intervenir otros mecanismos, como la formación de carbonatos, la aplicación de biocarbón y la formación de complejos arcillo-húmicos (Diacono y Montemurro 2010).

El potencial de un suelo para captar carbono no es finito, ya que se alcanzará un equilibrio en el que la tasa de formación de carbono orgánico en el suelo sea igual a su degradación, lo que significa que su concentración se mantiene estable.

⁴ Se cree que el LFOM es un charco transitorio de materia orgánica dentro de los suelos, en algún lugar entre los residuos frescos y la materia orgánica estable humificada.



Tabla 6 – Resumen del potencial de secuestro de C tras la aplicación de compost al suelo

Tipo de Compost	Tipo de suelo / Sistema de cultivo	Periodo de tiempo	C capturado	Referencia
Compost derivado de residuos verdes	Cuatro sitios en el Reino Unido	5 & 8 años	Aumento medio anual de SOC de 60 ± 10 kg C ha⁻¹ año⁻¹ t⁻¹ sólidos secos Similar a la tasa de 70 kg de C ha ⁻¹ año ⁻¹ t ⁻¹ de sólidos secos de Ros <i>et al.</i> 2006 (citado en Powlson <i>et al.</i> 2012) en Austria a lo largo de 12 años. El 23% del C orgánico en el abono permaneció en el suelo. (cf. alrededor de la mitad del carbono fue almacenado cuando los abonos de granja se aplicaron directamente al suelo)	Powlson <i>et al.</i> 2012
Compost de residuos lácteos	No se indica	5 años	El carbono almacenado en la materia orgánica del suelo representó alrededor del 11% de la cantidad total de C aplicada.	Citado en: Diacono & Montemurro 2010
Compost de estiércol de ganado	Arcilla limosa silíceo, Nebraska, EE.UU.	4 años	El 36% del carbono orgánico en el compost permaneció en el suelo al final del ensayo (cf. 25% de C aplicado como estiércol).	Eghball 2002
Compost de residuos verdes	Dos sitios experimentales en el Reino Unido: arenoso/ligero y medio (pesado) con un historial previo de aplicación de enmiendas orgánicas	9 años	20-24% del carbono orgánico fue retenido en el suelo (cf. 12% de estiércol de granja)	Bhogal <i>et al.</i> 2016
Residuos de jardín y domésticos digeridos anaeróbicamente y post-compuestos	Marga arenosa, Dinamarca	12 años	El 45% del C orgánico permaneció en la capa de arado después de 12 años de aplicación anual (cf. 38% de C para lodos de depuración y 21% para estiércol de ganado).	Peltre <i>et al.</i> 2017
Abono de estiércol de aves de corral	Dos tipos de suelo: limoso y arcilloso limoso.	19 años	Aumento del SOC de 2,22 toneladas/hectárea/año después de la aplicación del abono a 9 toneladas/hectárea (en comparación con el tratamiento convencional). Diferencia de 3,5 veces el sistema convencional. La aplicación de 700-800 kg C /ha/año aumentó el C del suelo en un 12% en 19 años. Tasa de aumento de 6,6% por año. Aumento de los niveles de SOC en el subsuelo observado.	Tautges <i>et al.</i> 2019

Tabla 7 – Valores de escenarios de carbono orgánico que permanece en el suelo a lo largo del tiempo (redondeado al entero más cercano y basado en la investigación presentada en la Tabla 3)

	Tiempo (años posteriores a la aplicación del compost)	% de carbono orgánico que queda en el suelo
Mínimo	4	11
Máximo	12	45
Medio	8	24
25 %	-	21
75 %	-	33

Por lo tanto, los datos del cuadro 6 sugieren que:

- Durante un período de 4 a 12 años, entre el 11% y el 45%⁵ del carbono orgánico aplicado al suelo como abono permaneció como carbono orgánico del suelo; y
- El carbono orgánico del suelo aumenta de entre 50-70 kg de C ha⁻¹ año⁻¹ t⁻¹ sólidos secos aplicados como abono son posibles. Estos valores se resumen en el cuadro 7.

⁵ Esto concuerda con Powlson *et al.* 2011, quienes sugirieron que, en condiciones de clima templado, alrededor del 33% del material vegetal permanece en el suelo después de un año.

En general, el contenido de **carbono orgánico del abono es de aproximadamente 17-18% (sobre la base de la materia seca)** y alrededor de 30% de materia orgánica (sobre la base de la materia seca); véase, por ejemplo, Bhogal *et al.* 2016. Esto es significativo en términos de cambio climático, ya que se piensa que:

Cada tonelada de **carbono orgánico del suelo contiene el equivalente a unas 3,67 toneladas de dióxido de carbono atmosférico** (GWA 2018). Basándose en investigaciones publicadas, Powlson y otros 2012 calcularon los cambios netos de las emisiones de gases de efecto invernadero resultantes de la aplicación de diversos

materiales orgánicos (Cuadro 8). Estos cálculos no sólo tienen en cuenta el potencial de secuestro debido al aumento del carbono orgánico del suelo, pero también evitó las emisiones de N₂O al compensar el uso de fertilizantes inorgánicos.

Tabla 8 – Cambios netos calculados de las emisiones de gases de efecto invernadero resultantes de la aplicación de materiales orgánicos seleccionados (basado en los datos publicados por Powlson *et al.* 2012)

Material Orgánico	Tasa de Aplicación	Cambio neto del CO ₂ -eq debido al aumento del carbono orgánico del suelo	Cambio neto de CO ₂ -eq debido al ahorro de nitrógeno (ahorro de fabricación y cambios en N ₂ O)	Ahorro neto total de CO ₂ -eq	Ahorro neto de CO ₂ -eq / ton o m ³ (masa fresca) debido al aumento de SOC	Ahorro neto total del CO ₂ -eq / ton o m ³ (masa fresca)
	Toneladas o m ³ (masa fresca) / hectárea	CO ₂ -eq (kg ha ⁻¹ año ⁻¹)				
Abono de ganado	42	2310	290	2600	55	62
Abono lácteo	83	1100	120	1220	13	15
Compost verde	36	5130	110	5240	143	146

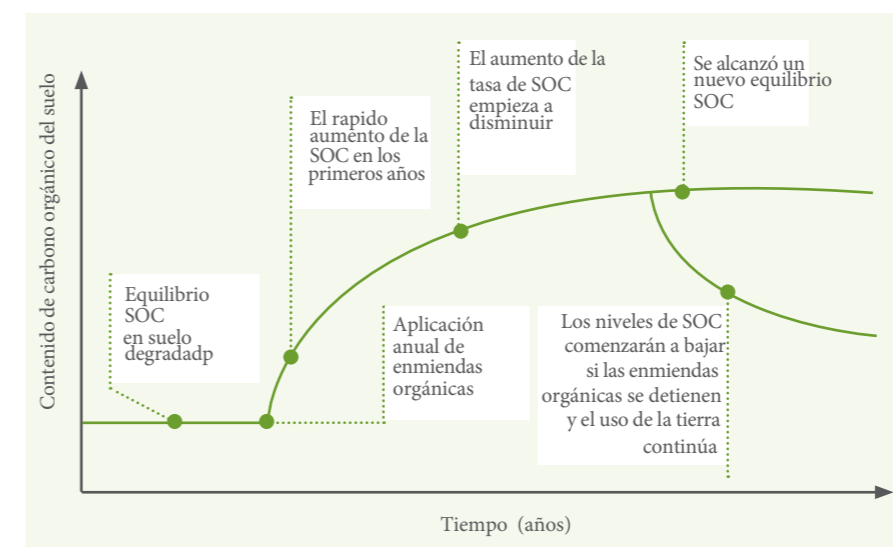
Los datos publicados por Powlson y otros (2012) sugieren que:

1 tonelada (masa fresca) de abono derivado de residuos verdes aplicado al suelo en más de una hectárea (10.000 metros cuadrados) resulta en un ahorro neto de CO₂-eq. de 143 kg/ha/año debido al aumento de SOM solamente (excluyendo la compensación de fertilizantes).

Además, se demostró que la aplicación de compost al suelo también puede dar lugar a un aumento transitorio de la absorción de metano por el suelo, lo que confiere beneficios adicionales en cuanto a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (Ho *et al.* 2015). El aumento de la SOC en el subsuelo debe protegerlo contra la degradación (Tautges *et al.* 2019)

A pesar de los beneficios de la aplicación de compost al suelo, el aumento de la materia orgánica del suelo no aumenta linealmente. Se cree que los principales beneficios para los suelos se obtienen en los primeros 20 años más o menos, con beneficios decrecientes tras la aplicación a medida que se alcanza un nuevo equilibrio; véase la figura 11. Esto se observó en experimentos de campo a largo plazo con estiércol de granja, que demostraron que la tasa de aumento de los SOC comienza a reducirse a medida que se aproxima un nuevo equilibrio (Powlson *et al.* 2012).

Figura 11 – Diagrama esquemático que muestra los cambios en el contenido de SOC tras la aplicación del compost



Powlson y otros (2011) citan la limitación del secuestro de carbono en el suelo:

- La cantidad de C retenida es finita: el aumento del contenido de SOC cesa al acercarse a un nuevo valor de equilibrio; y
- El proceso es reversible: el cambio en la gestión de la tierra⁶ que conduce a un aumento de C en el suelo o la vegetación debe continuar indefinidamente para mantener el aumento de la reserva de SOC⁶.

⁶ Además, los cambios en las prácticas de ordenación de la tierra también pueden modificar los flujos de óxido nítrico o metano, ambos poderosos gases de efecto invernadero.

Suelo arcilloso

La arcilla está compuesta por ciertos tipos de minerales, incluyendo los filosilicatos de aluminio hidratado. También puede asociarse con trazas de cuarzo, óxidos metálicos, materia orgánica y ciertos metales, entre ellos el hierro y el magnesio. Tiene una textura muy fina, lo que le da su naturaleza plástica cuando está húmeda; sin embargo, también se endurece mucho cuando está seca.

Se cree que la arcilla se une a las sustancias húmicas para formar un complejo arcillo-húmico, y se piensa que esto aumenta la estabilidad de la materia orgánica y aumenta su resistencia a la biodegradación (Amlinger et al. 2007), aunque no se comprenden del todo los mecanismos precisos para ello. Los experimentos sugieren que a medida que aumenta el contenido de arcilla del suelo, también aumenta el carbono de la biomasa microbiana del suelo (Pedraa et al. 2007); mientras que se observa una fuerte correlación entre el carbono del suelo y el porcentaje de arcilla.

El co-compostaje de residuos biodegradables con arcilla se practica tradicionalmente en China (Rey 1911) y estudios científicos recientes han sugerido que el co-compostaje de enmiendas orgánicas con materiales de arcilla es eficaz para estabilizar el carbono (C) en el suelo. Esto fue demostrado por Bolan y otros (2012) quienes concluyeron que: "La estabilización del C en el compostaje con materiales de arcilla no sólo mantiene su valor para mejorar la calidad del suelo ... sino que también contribuiría a aumentar la reserva de C del suelo a largo plazo".

Además, comienzan a surgir pruebas de que el co-compostaje de residuos biodegradables con materiales alcalinos también puede aumentar la estabilización del carbono (Chowdhury et al. 2016).

Emisiones de Carbono del Transporte

Como la mayor parte del compost se transporta por carretera hasta el lugar donde se aplica, se reconoce generalmente que las distancias de transporte deberían reducirse al mínimo para disminuir las emisiones de dióxido de carbono que emanan del combustible de transporte. Sin embargo, los cálculos realizados por Smith & Smith (2000) indican que "los costos del combustible [carbono] C para transportar recursos son mucho menores que los beneficios del C de las opciones de mitigación agrícola".

Los investigadores calcularon el potencial de mitigación de carbono de la aplicación de abono y lodos residuales a la tierra cultivable (cálculos a nivel europeo) y las emisiones de carbono asociadas al movimiento de los materiales orgánicos por kilómetro. En general, calcularon que las emisiones derivadas del transporte de estos materiales por 100 km liberarían lo siguiente:

- Los lodos de aguas residuales - menos del 1% del C se benefician de la mitigación; y
- Estiércol animal - alrededor del 30% del C se beneficia de la mitigación.

En general, concluyeron que: "es improbable que las distancias de transporte inferiores a 100 km anulen el beneficio neto de C de las opciones examinadas".

5.2.3 Estructura del suelo

La estructura del suelo está determinada por la forma en que sus partes sólidas se unen. Afecta a los poros (espacios de aire) del suelo y, por lo tanto, influye en su capacidad para retener la humedad, permitir que el aire se difunda y que crezcan las plantas. En general, los suelos cultivados, como los que se utilizan para los cultivos herbáceos, tienden a tener una estructura deficiente como resultado de la compactación causada por el arado y la pérdida de materia orgánica.

Las mejoras en la materia orgánica del suelo van de la mano con la mejora de la estructura del suelo; de ahí que las investigaciones que han demostrado la adición de enmiendas orgánicas (como el compost) no sólo aumentan el contenido de carbono orgánico del suelo, sino que también mejoran su estructura. La agregación del suelo es importante ya que se piensa que aumenta la estabilidad del carbono y reduce su renovación en el suelo. Además, investigaciones recientes han sugerido que los poros del suelo pueden desempeñar un papel importante en la estabilización del carbono del suelo, lo que significa que el aumento del número de poros del suelo también puede aumentar la capacidad del suelo para retener nuevos aportes de carbono (Kravchenko et al. 2019).

Se ha demostrado que las adiciones de compost al suelo:

- Mejoran la agregación del suelo y conducen a la captura de carbono en un suelo mediterráneo (Ortas et al. 2013). Los experimentos también demostraron que el tamaño de los agregados y el carbono orgánico del suelo asociado a los agregados aumentaba con los tratamientos de compostaje y de abono orgánico, y que la SOC se asociaba a los agregados estables. La SOC se asoció con agregados más grandes (0,5 - 1,0 mm) que los agregados más pequeños de 0,25 mm.
- Las investigaciones resumidas en un examen de Diacono y Montemurro (2010) indicaron que las aplicaciones semestrales de compost de residuos sólidos municipales aumentaron la estabilidad de los agregados del suelo en un 29% en relación con el control.

• Diacono & Montemurro también resumieron las investigaciones publicadas que sugerían que la aplicación a largo plazo de enmiendas orgánicas, como el compost, reducía la densidad aparente del suelo agrícola en un promedio del 15%.

• Los datos derivados de varios lugares del Reino Unido indicaron que se observó una reducción del 5% en la densidad aparente del suelo tras la aplicación repetida de compost derivado de residuos verdes a los suelos cultivables durante 9 años (Bhogal et al, 2016)

La aplicación repetida de compost aumenta la estabilidad de los agregados y los poros del suelo, y reduce la compactación

La reducción de la densidad aparente también mejora la capacidad de trabajo del suelo, reduciendo así la resistencia a la fricción durante el arado.

5.2.4 Capacidad de retención de agua del suelo

Se cree que la materia orgánica aumenta la capacidad de retención de agua de un suelo a través de dos importantes mecanismos

• Debido a su bioquímica hidrófila (que atrae el agua); y

• Debido a su efecto sobre los agregados del suelo y al aumento de la porosidad del suelo, lo que significa que hay más canales en el suelo en los que retener el agua.

La capacidad de agua disponible (CAD; véase el recuadro) es la métrica comúnmente utilizada para medir la capacidad de un suelo para retener agua.

Un examen llevado a cabo por Huntingdon (2007) sugirió que la textura del suelo (es decir, su composición relativa de arena, limo y arcilla) afectaba significativamente a la relación entre

el contenido de materia orgánica del suelo y su CAD. Esto significa que dependiendo del tipo de suelo, los cambios en el contenido de SOM tienen un impacto diferencial en su CAD. En general, los suelos de textura media a gruesa muestran mayores aumentos en la CAD debido al aumento del contenido de SOM en comparación con los suelos de textura más fina.

Huntingdon revisó una serie de publicaciones y señaló que había un cambio medio en la CTA de **1,1 cm³ de agua/100 cm³ de suelo para un aumento del 5% en la SOM** (donde la concentración inicial de SOM estaba en el rango del 2-4% en peso). Sin embargo, también observó que algunos estudios no encontraron ninguna relación entre el contenido de SOM y su CTA; una observación que también

señalaron Bhogal y otros (2016) y Minasny & McBratney (2018).

Un examen realizado por consultores en nombre de la Comisión Europea (Servicio de Inteligencia BIO 2014) indicó que un aumento del 1% en el SOM incrementa el CMA en más de un 1,5-2%.

Más recientemente, un meta-análisis de datos de Minasny & McBratney (2018) indicó que: "**un aumento de masa del 1% en el suelo OC en promedio aumentó la capacidad de agua disponible en un 1,16%, volumétricamente**".

Medición de la capacidad de retención de agua del suelo

Los científicos del suelo utilizan el término "capacidad de agua disponible". Esto se define como:

Capacidad de Agua Disponible (CAD) = La cantidad de agua (cm³ de agua/100 cm³ de suelo) retenida en el suelo entre la Capacidad de Campo' (FC, por sus siglas en inglés) y el **Punto de Marchitamiento Permanente (PWP, por sus siglas en inglés)**.

La **capacidad de campo** es la fracción volumétrica del agua en el suelo con un potencial de agua en el suelo de 10-33 kPa.

El punto de marchitamiento permanente es la fracción volumétrica del agua en el suelo a un potencial hídrico del suelo de 1500 kPa.



5.2.5 La Biología del suelo

Se ha demostrado que la aplicación repetida de enmiendas orgánicas (incluido el compost) a las tierras de cultivo mejora las funciones biológicas del suelo. Esto incluye los efectos sobre los microbios autóctonos del suelo, así como sobre los invertebrados como las lombrices o gusanos.

Aunque las enmiendas del compost actuarán como fuente de microorganismos adicionales, se cree que los principales efectos en la biología del suelo se deben al carbono y a los nutrientes presentes en el compost, que proporcionan un recurso alimenticio para los microbios e invertebrados ya presentes en el suelo. Se cree que los diferentes tipos de materia orgánica afectan de manera diferente a la actividad microbiana del suelo (Peltre, 2017).

Las investigaciones demuestran que la aplicación de abono a los suelos puede afectar a los microorganismos del suelo de dos maneras importantes (Diacono & Montemurro, 2010 & De Araújo *et al.* 2010):

- aumenta la biomasa microbiana del suelo, lo que significa que hay más microbios presentes; y
- Aumenta la actividad de los microbios, medida con enzimas indicadoras o con técnicas de respiración.

Esto es importante por varias razones:

- Mejora el reciclaje de nutrientes;
 - Incrementa la resistencia de los cultivos a las enfermedades (supresión de patógenos); y
 - Mejora la estabilidad estructural del suelo debido a la formación de polisacáridos exógenos (que tienden a actuar como pegamento, aumentando la estabilidad del suelo) y sustancias húmicas.
- En el cuadro 9 se resumen ejemplos de resultados de investigaciones.

Tabla 9 – Efecto de la incorporación de compost en las propiedades biológicas del suelo

Tipo de compost	Tipo de suelo/Sistema de cultivo	Período de tiempo	Efecto(s) observado(s)	Referencias
El compost derivado de los RSU	Textura arenosa y bajo contenido de materia orgánica, España	9 años	Compost aplicado a 20 y 80 toneladas / ha. Aumento de la biomasa microbiana del suelo de 10 y 46% a las tasas de 20 & 80 t/ha, respectivamente. Aumento de las enzimas oxidoreductasas (por ejemplo, deshidrogenasa y catalasa), incrementado en 730 (C20) y 200% (C80), respectivamente (comparado con el control). Atribuido a la estimulación microbiana por el carbono orgánico.	García-Gil <i>et al.</i> 2000
Compost derivado de los RSU Documento de revisión	Numerosos	-	Los autores señalaron que: "El sistema de suelo que recibe más materia orgánica tiende a albergar niveles más altos de suelo [carbono de biomasa microbiana] con mayor actividad microbiana". Se encontró que el carbono de la biomasa microbiana, la actividad respiratoria del suelo y las actividades enzimáticas aumentan con el incremento de las dosis de compost de RSU. El compost de los RSU tuvo un efecto positivo en la actividad de las enzimas relacionadas con los ciclos C, N y P.	De Araújo <i>et al.</i> 2010
Revisión de la literatura sobre la capacidad de eliminación de enfermedades de los materiales compostados en la horticultura, la agricultura y las aplicaciones de césped.	Numerosos	-	Evidencia de la eliminación de las enfermedades transmitidas a través del suelo por el abono. En especial: Se encontró una importante reducción de la enfermedad con tasas de inclusión de abono de < 20% v/v en el suelo; sin embargo, se necesitaban altas tasas de aplicación para mostrar los efectos en el campo. La mayoría de las investigaciones se han realizado en contenedores. Se observó la supresión de lo siguiente con el compost de residuos verdes: <ul style="list-style-type: none"> • Pudriciones y marchitamientos causados por <i>Fusarium oxysporum formae speciales</i>; • Amortiguamiento causado por <i>Rhizoctonia solani</i> (pero menos fiable); • Dólar mancha en el césped (causado por la <i>Sclerotinia homoeocarpa</i>) al utilizar el compost como un top-dressing. 	Noble <i>et al.</i> 2006
Compost de residuos verdes	Dos sitios experimentales en el Reino Unido: arenoso/ligero y medio (pesado) con un historial previo de aplicación de enmiendas orgánicas	9 años	Aumento del carbono de la biomasa microbiana del suelo en ~17% y del nitrógeno de la biomasa microbiana del suelo en ~23% (datos extrapolados de los gráficos de barras). Aumento del número de lombrices de tierra observado.	Bhogal <i>et al.</i> 2016

Los datos resumidos en el cuadro 9 indican que tras la aplicación del compost al suelo:

- Se detectaron experimentalmente aumentos de hasta el 100% en la biomasa microbiana del suelo...
- Se registraron aumentos en la densidad de las lombrices de tierra; y
- Se midieron los incrementos en las actividades enzimáticas asociadas con el reciclaje de carbono, nitrógeno y fósforo;
- El compost verde derivado de residuos puede ser eficaz para suprimir los patógenos de plantas de importancia hortícola que se encuentran en el suelo; sin embargo, se necesitan altas tasas de aplicación para mostrar los efectos en el campo.

5.2.6 La fertilidad del suelo

Como el compost y muchas otras enmiendas orgánicas contienen nitrógeno, fósforo y potasio, no es de extrañar que las aplicaciones repetidas de estos materiales puedan mejorar la fertilidad del suelo y, por lo tanto, su capacidad para sostener el crecimiento de las plantas. Hay numerosos ejemplos de investigaciones publicadas que muestran los efectos de fertilización de las adiciones de compost y cuantifican el efecto en una amplia gama de rendimiento de los cultivos (véase por ejemplo Amlinger *et al.* 2007; ECN

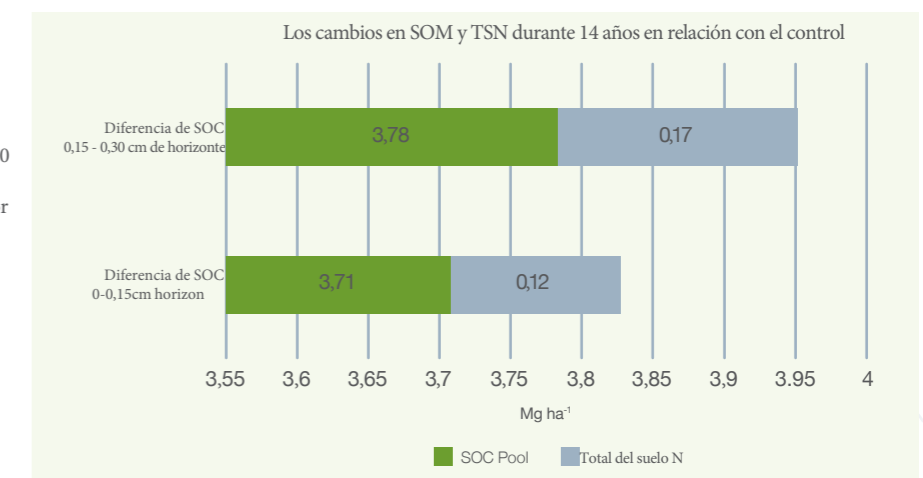
En su análisis, Diacono y Montemurro (2010) indicaron que las aplicaciones repetidas de compost pueden aumentar el contenido de nitrógeno orgánico del suelo hasta en un 90%. Ortas y otros (2013) también midieron los aumentos del nitrógeno total del suelo y del carbono orgánico del suelo tras la aplicación a largo plazo de compost en un suelo mediterráneo; los datos se reproducen en la figura 12.

Este nitrógeno no está disponible en una forma mineral fácilmente disponible (como sería el caso de un fertilizante inorgánico convencional), sino que forma parte de la materia orgánica del suelo y se libera gradualmente a lo largo del tiempo por la acción de los microbios del suelo. Las tasas de mineralización del nitrógeno pueden variar dependiendo de la enmienda orgánica, el tipo de suelo, el clima, etc.; sin embargo, se cree que entre el 0 y el 20% del contenido total de nitrógeno se mineralizará y estará disponible para la absorción por parte de las plantas en el primer año posterior a la aplicación (Prasad, 2009). Esta lenta liberación de nitrógeno, que está ligado como parte de la materia orgánica del suelo, significa que es mucho menos probable que se filtre a las aguas subterráneas y cause contaminación, a diferencia de los fertilizantes minerales. También significa que las aplicaciones repetidas de compost pueden construir un "banco de nutrientes" y mejorar un

la fertilidad general del suelo. Diacono y Montemurro (2010) indican que hay "un importante efecto residual de las aplicaciones acumulativas que se hace visible más tarde después de 4-5 años, lo que da lugar a una mayor disponibilidad y rendimiento de N diferido".

La aplicación regular de compost al suelo puede acumular una reserva de nutrientes, especialmente de nitrógeno, que aumenta la fertilidad del suelo y mejora su capacidad de crecimiento de los cultivos

Figura 12 – Aumento del nitrógeno total del suelo tras la aplicación de compost al suelo durante 14 años (Basado en datos publicados por Ortas *et al.* 2013)



5.2.7 La capacidad de intercambio de cationes del suelo y el pH

El compost en general, y el humus en particular, tienen la capacidad de unir cationes (iones con carga positiva) porque tienen ligeras cargas negativas en su superficie. Esto se denomina capacidad de intercambio catiónico (CEC, por sus siglas en inglés) y es importante en el suelo, ya que ayuda a ligar los principales nutrientes de las plantas como el calcio, el magnesio, el potasio y el sodio.

La aplicación de compost al suelo y el aumento de la capacidad orgánica del suelo se ha demostrado que el contenido de materia prima aumenta su CEC, lo que ayuda a actuar como amortiguador de nutrientes (Wallace & Brown, 2004; Amlinger y otros, 2007; Aduña, 2016).

Además, como la mayoría de los abonos tienden a ser ligeramente alcalinos, pueden ayudar a prevenir la acidificación del suelo con el tiempo.

Los agricultores añaden cal al suelo para aumentar su pH y ayudar a mejorar la absorción de nutrientes de los cultivos. El compost puede compensar parcialmente el uso de la cal, teniendo un valor neutralizante de hasta el 15% de cal en base a la masa seca (Amlinger *et al.* 2007; Earthcare Technical Scotland, 2011; Aduña, 2016).

5.2.8 Calidad del suelo y contaminación

Las enmiendas orgánicas, incluido el compost, contienen sustancias que pueden afectar negativamente a la calidad del suelo. Algunas de ellas están presentes de forma natural en los suelos, como los metales pesados, mientras que otras son de origen humano, como los plásticos, el vidrio, los metales y algunos compuestos orgánicos. Generalmente se denominan contaminantes o impurezas. Algunos metales pesados, como el cobre y el zinc, son micronutrientes para las plantas y se necesitan en bajas concentraciones para apoyar el crecimiento saludable de las plantas. Sin embargo, cuando hay altas concentraciones presentes en el suelo, pueden afectar negativamente al crecimiento de las plantas, a la calidad de los cultivos y a los micro y macroorganismos del suelo. Tras un análisis de la literatura publicada, Diacono y Montemurro (2010) proponen que cuando se aplica un abono de alta calidad a los suelos durante largos

períodos de tiempo no hay pruebas tangibles que demuestren los impactos negativos de los metales pesados en los suelos. Las aplicaciones repetidas de compost y digestato de calidad en varios lugares del Reino Unido también indicaron que no había ningún efecto en las concentraciones de contaminantes de metales y compuestos orgánicos totales del suelo o en las concentraciones de metales de los cultivos (Bhogal *et al.* 2016). Smith (2009) indicó que el compost puede reducir la solubilidad y la biodisponibilidad de los metales pesados en el suelo, debido a la complejación con la materia orgánica. También indicó que no hay pruebas de liberación de metales pesados tras la degradación de la materia orgánica en el suelo. En general, llegó a la conclusión de que: "es probable que los procesos de compostaje en general contribuyan a reducir la disponibilidad de metales en los suelos modificados en comparación con otras técnicas de bioestabilización de residuos".

Dado que la aplicación repetida de compost contaminado tiene el potencial de acumular contaminantes en el suelo, es motivo de preocupación para los reguladores ambientales, los científicos del suelo, los administradores de tierras y los agrónomos. Se han establecido niveles límite de concentración preventivos para una serie de contaminantes en las normas de calidad del compost a nivel nacional y europeo (véase, por ejemplo, el plan de garantía de calidad de la Red Europea de Compost ECN-QAS), que tienen por objeto proteger el suelo. Los beneficios para el suelo de la aplicación del compost y el digestato descritos en este informe suponen que se han obtenido a partir de biorresiduos recogidos por separado (no residuos residuales mezclados) y que contienen bajos niveles de contaminantes, incluidos los metales pesados.

⁷ El pH es una medida de cuán ácida o alcalina es una solución a base de agua. Un pH de 7 significa que la solución es neutra (ni ácida ni alcalina), un pH inferior a 7 significa que es ácida, mientras que un pH superior a 7 significa que es alcalina.

Los Beneficios de aplicar digestato al suelo

Los beneficios a largo plazo para el suelo del digestato anaeróbico son menos claros que los del compost; no obstante, se incluye un resumen de las publicaciones pertinentes en el que se destacan los principales resultados de la investigación

5.3.1 La materia orgánica y la estructura del suelo

Como la digestión anaeróbica es más adecuada como proceso para tratar residuos orgánicos putrescibles (fácilmente degradables) en comparación con el compostaje, esto afecta a los tipos de compuestos orgánicos presentes en el digestato. Además, como hay pocos indicios de humidificación durante el proceso y el hecho de que los materiales que contienen lignina no suelen tratarse de manera anaeróbica, el digestato tiene, por lo tanto, bajas concentraciones de sustancias húmicas en comparación con el compostaje. En este es, por lo tanto, resultado tanto de la naturaleza de las materias primas tratadas como del propio proceso de digestión anaeróbica (DA).

Se cree que entre el 20 y el 95% del carbono de los residuos orgánicos putrescibles se transforma en compuestos gaseosos de carbono (principalmente

metano y dióxido de carbono) durante el año DA (Möller 2015). El análisis espectroscópico del digestato ha demostrado que la estabilización del mismo se debe a la acumulación de compuestos de carbono estables durante el proceso, ya que los compuestos más lábiles se degradan, en lugar de la humificación per se (Marcato et al. 2009).

Möller (2015) cita algunos trabajos de investigación en los que se demuestra que el digestato reduce la densidad aparente del suelo, aumenta la estabilidad de los agregados y aumenta la retención de la humedad; sin embargo, también señala que "no se dispone de una evaluación de los efectos directos a largo plazo de la aplicación del digestato en las propiedades físicas del suelo en comparación con la materia prima no digerida".

Investigaciones realizadas en el Reino Unido indicaron que el digestato derivado de residuos de alimentos y estiércol aplicado en varios sitios durante un período de tres años, se demostró que aumentaba la compactación del suelo (medido por la densidad aparente, la fuerza de corte y la resistencia a la penetración), aunque los autores no pudieron identificar por qué esto sucedió (Bhogal et al. 2016).

En general, se piensa que el digestato anaeróbico tiene un efecto insignificante sobre la materia orgánica del suelo a largo plazo (Möller, 2015).



5.3.2 Biología del suelo

Se midió el aumento de la actividad microbiana del suelo después de la aplicación del digestato. Möller (2015) señaló que "muchos informes indican un aumento de la actividad microbiana del suelo después de las aplicaciones en el campo de los digestatos en comparación con los fertilizantes inorgánicos o los controles no tratados", que se cree que se debe al suministro de nutrientes. Se llegó a la conclusión de que "los principales efectos directos de la digestión anaeróbica a nivel de campo son los efectos a corto plazo en la actividad microbiana del suelo y los cambios en la comunidad microbiana del suelo".

Aunque se observaron aumentos en la actividad microbiana del suelo, Bhogal y otros (2016) informaron de una disminución del número de lombrices de tierra tras la aplicación de digestores derivados de residuos de alimentos en comparación con el control de fertilizantes, que se atribuyó a los niveles de amonio-nitrógeno.

5.3.3 La fertilidad del suelo

El beneficio significativo de aplicar el digestato al suelo es su alto contenido en nutrientes (véase, por ejemplo: Fachverband Biogas, 2018 y WRAP 2019). A diferencia del compost, la mayoría de los nutrientes vegetales (N, P y K) están presentes en forma mineral, por lo que están fácilmente disponibles para su absorción por los cultivos. Por lo tanto, el digestato se ve mejor como un biofertilizante.

Numerosos autores han observado mejoras en los niveles de nutrientes del suelo, entre ellos Möller (2015) y Bhogal y otros (2016).



Conclusión

Este informe resume algunas de las propiedades físico-químicas del suelo y destaca el importante papel que desempeña al proporcionar un medio para que los humanos cultiven alimentos. En particular, la materia orgánica del suelo es una importante reserva de carbono, que almacena más que la atmósfera y la vegetación terrestre juntas. Sin embargo, este recurso finito está amenazado por la erosión el agotamiento de los nutrientes y la contaminación, y una estimación sugiere que en los últimos 40 años alrededor del 30% de las tierras de cultivo del mundo se han vuelto improductivas. Recientemente, la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación indicó que alrededor de un tercio de los suelos del mundo están moderadamente o altamente degradados; en un mundo con una población en aumento y cambios climáticos, esto tiene el potencial de socavar la capacidad de los seres humanos para cultivar y cosechar alimentos de manera sostenible.

La gestión de los residuos y el reciclaje de los residuos orgánicos putrescibles puede contribuir a la mejora de los suelos. Dado que se generan anualmente algo menos de mil millones de toneladas de residuos orgánicos putrescibles del suelo municipal, se trata de un recurso valioso, que contiene tanto carbono como nutrientes vegetales. El reciclaje de estos residuos para hacer compost puede ayudar a mejorar el suelo y a frenar su degradación, y de este modo contribuir a cumplir los Objetivos 12 y 15 de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas. Según los conocimientos existentes, el compost y el digestato anaeróbico no pueden considerarse equivalentes en lo que respecta a sus propiedades de enmienda del suelo y sus efectos fertilizantes; en general, se ha demostrado que el digestato anaeróbico contiene cantidades agrónomicamente útiles de nutrientes vegetales que aumentan el rendimiento de los cultivos y reducen la necesidad de fertilizantes químicos, aunque todavía no se han demostrado científicamente sus efectos beneficiosos en el contenido y la estructura de la materia orgánica del suelo. Por lo tanto, se considera mejor como un fertilizante orgánico, ya que contiene fósforo reciclado (una materia prima fundamental) y nitrógeno

(evitando la necesidad de fabricar fertilizantes minerales de N mediante procesos industriales intensivos en energía)⁸. El compost se clasifica mejor como un mejorador de suelo orgánico. Por lo general, tiene menos nutrientes vegetales disponibles que el digestato, pero contiene materia orgánica estable (sustancias húmicas) que contribuyen al contenido de materia orgánica del suelo. Numerosos estudios demostraron que la aplicación repetida de compost puede aumentar la estabilidad de los agregados del suelo y el tamaño de los poros del suelo, reducir la compactación y aumentar la capacidad de retención de agua. La aplicación de compost al suelo también demostró que puede aumentar la biomasa microbiana del suelo y la actividad microbiana, así como crear un depósito de nutrientes.

El principal valor del compost es su capacidad de secuestrar carbono en el suelo, y los estudios resumidos en este informe señalan que, en un período de entre 4 y 12 años, en la región, entre el 11% y el 45% del carbono orgánico aplicado al suelo como compost permaneció como carbono orgánico del suelo.

Como el Banco Mundial estima que alrededor de un tercio de los residuos sólidos municipales del mundo no se gestiona de forma "ambientalmente segura", la recogida y el reciclaje eficaces de los residuos orgánicos putrescibles pueden tener un resultado beneficioso para todos. Evitar la atracción de bichos y la generación de malos olores y de metano, así como el mejoramiento del suelo agrícola tiene el potencial de mejorar significativamente la vida, contribuir a aumentar la seguridad alimentaria, combatir la desertificación y ayudar a reducir los niveles de dióxido de carbono en la atmósfera.

Por lo tanto, el reto para los planificadores y gestores de residuos es conseguir y recoger residuos orgánicos putrescibles limpios y sin contaminantes, para luego reciclarlos en un compost de calidad.

Por lo tanto, las implicaciones para el contenido de materia orgánica del suelo son potencialmente significativas. El próximo informe de esta serie proporcionará estimaciones de los posibles beneficios teóricos para el suelo que pueden lograrse a nivel mundial y en varios países diferentes, cada uno de los cuales tiene diferentes tipos de suelo y condiciones climáticas.

⁸ El importante papel de DA en la producción de biogás, un combustible renovable y neutro en carbono, no ha sido considerado en - y estaba fuera del alcance de - este documento y debe tenerse en cuenta al hacer una comparación más general entre el compostaje y la digestión anaeróbica de los residuos orgánicos putrescibles



Referencias

Adani F, Tambone F and Genevini, P (2009)

Efecto de la tasa de aplicación de compost en la degradación y retención del carbono en los suelos. *Waste Management* 29: 174-179.

Aduña (2016)

Un examen de los efectos del compost en las propiedades del suelo, el uso del agua y la productividad de los cultivos. *Academic Research Journal of Agricultural Science and Research* 4(3): 93-104.

AHDB (2019)

Estudio de caso de investigación de la Asociación de Biología del Suelo y Salud del Suelo. Prueba del efecto de las adiciones de material orgánico en la salud del suelo. Junta de Desarrollo de la Agricultura y la Horticultura. Disponible en <https://ahdb.org.uk/knowledge-library/research-case-study-testing-the-effect-of-organic-material-additions-on-soil-health> (Consultado el 28 de junio de 2019).

Aiken GR, McKnight DM, Wershaw RL and MacCarthy P (1985).

Sustancias húmicas en el suelo, los sedimentos y el agua. En: *Geoquímica, Aislamiento y Caracterización*. Nueva York, John Wiley & Sons.

Albrecht R, Périssol C, Ruauel F, Le Petit J and Terrom G (2010)

Cambios funcionales en las comunidades microbianas cultivables durante un proceso de co-composición: Utilización de la fuente de carbono y co-metabolismo. *Gestión de residuos* 30 764-770.

Amlinger F, Peyr S, Geszti J, Dreher P, Weinfurter K, and Nortcliff S (2007)

Efectos benéficos de la aplicación del compost en la fertilidad y la productividad de los suelos Estudio de la literatura. Ministerio Federal de Agricultura y Silvicultura, Medio Ambiente y Ordenación de los Recursos Hídricos, Austria.

Bhogal A, Taylor M, Nicholson F, Rollett A, Williams J, Newell Price P, Chambers B, Litterick, A and Whittingham, M. (2016)

Paquete de trabajo 1 Informe final (2010-2015) DC-Agri; experimentos de campo para digerir y compostar de calidad en la agricultura. Programa de acción sobre residuos y recursos. Disponible en <http://www.wrap.org.uk/content/digestate-and-compost-agriculture-dc-agri-reports> (Consultado el 28 de junio de 2019).

Binner E, Smidt E, Tintner J, Böhm K and Lechner P (2011)

Cómo mejorar la humidificación durante el compostaje de residuos biológicos recolectados por separado: impacto de la materia prima y el procesamiento. *Waste Management & Research* 29(11): 1153-1163.

BIO Intelligence Service (2014),

El suelo y el agua en un entorno cambiante. Informe final preparado para la Comisión Europea (DG ENV), con el apoyo de HydroLogic. Disponible en <https://ec.europa.eu/environment/soil/pdf/Soil%20and%20Water.pdf> (Consultado el 13 de Agosto de 2019).

Bolan NS, Kunhikrishnan A, Choppala GK, Thangarajan R and Chung JW (2012)

Estabilización del carbono en compost y biocarburantes en relación con el secuestro de carbono y la fertilidad del suelo. *Ciencia del Medio Ambiente Total* 424: 264-270.

Bot A and Benites J (2005)

La importancia de la materia orgánica del suelo: clave para un suelo resistente a la sequía y una producción alimentaria sostenida. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Disponible en <http://www.fao.org/3/a0100e/a0100e00.htm> (Consultado el 13 de agosto de 2019).

Chowdhury S, Bolan NS, Seshadri B, Kunhikrishnan A, Wijesekara H, Xu Y, Yang J, Kim G-H, Sparks D and Rumpel C (2016)

Co-compostaje de residuos orgánicos putrescibles biológicos sólidos con materiales alcalinos para mejorar la estabilización del carbono y el potencial de revegetación. *Environmental Science and Pollution Research* 23:7099-7110.

De Araújo ASF, de Melo WJ and Sing RP (2010)

Enmienda del compost de residuos sólidos municipales en el suelo agrícola: cambios en la biomasa microbiana del suelo. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* 9: 41-49.

De Neve S, Sleutel S and Hofman G (2003)

Mineralización del carbono de los compost y los residuos de la industria alimentaria añadidos al suelo. Ciclo de nutrientes en los agroecosistemas 67: 13-20.

Diacono M and Montemurro F (2010)

Efectos a largo plazo de las enmiendas orgánicas sobre la fertilidad del suelo. Una revisión. *Agronomía para el Desarrollo Sostenible* 30: 401-422.

Earthcare Technical Scotland (2011)

Hoja informativa sobre el compost verde para los agricultores. Disponible en <http://www.keenanrecycling.co.uk/wp-content/uploads/2016/03/green-compost-use-in-agriculture.pdf> (Consultado el 13 de Agosto de 2019).

European Commission (2019)

Política Agrícola de la UE - Impacto en la gestión sostenible del suelo. Disponible en https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/initiatives/ares-2019-3760776_en (Consultado el 30 de agosto de 2019).

European Compost Network Quality Assurance Scheme (ECN-QAS)

Available at: www.compostnetwork.info/ecn-qas/ (Consultado el 13 de agosto de 2019).

ECN (2017)

Aplicación sostenible del compost en la agricultura - Versión inglesa del resumen del informe alemán -09/2017. Disponible en <https://www.compostnetwork.info/wordpress/wp-content/uploads/ECN-Info-Paper-09-2017-Longterm-use-of-Compost-in-Agriculture.pdf> (Consultado el 13 de agosto de 2019).

Eghball B (2002)

Las propiedades del suelo están influenciadas por las aplicaciones de estiércol y compost a base de fósforo y nitrógeno. *Agronomy Journal* 94: 128-135.

Fachverband Biogas (2018)

Digestato como Fertilizante. Disponible en: www.digestate-as-fertilizer.com (Consultado el 13 de Agosto de 2019)

FAO (2015a)

El suelo es un recurso no renovable. La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Disponible en www.fao.org/3/a-i4373e.pdf (Consultado el 13 de Agosto de 2019)

FAO (2015b)

Estado de los suelos del mundo. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. <http://www.fao.org/3/a-i5199e.pdf> (Consultado el 13 de Agosto de 2019)

FAO and ITPS (2018).

Informe técnico del Mapa Global del Carbono Orgánico del Suelo (GSOCmap). Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación y Grupo Técnico Intergubernamental sobre el Suelo. Disponible en www.fao.org/global-soil-partnership/pillars-action/4-information-and-data-new/global-soil-organic-carbon-gsoc-map/en/ (Consultado el 13 de Agosto de 2019)

García-Gil JC, Plaza C, Soler-Rovira P and Polo A (2000)

Efectos a largo plazo de la aplicación de compost de residuos sólidos municipales en las actividades enzimáticas del suelo y la biomasa microbiana. *Soil Biology & Biochemistry* 32: 1907-1913.

GWA (2018)

El carbono orgánico del suelo y el secuestro de carbono. Gobierno de Australia Occidental. Disponible en www.agric.wa.gov.au/climate-change/soil-organic-carbon-and-carbon-sequestration (Consultado el 13 de Agosto de 2019)

Hamoda MF, Abu Qdais HA and Newham J (1998)

Evaluación de la cinética de compostaje de los residuos sólidos municipales. *Recursos, conservación y reciclaje* 23: 209-223.

Ho A, Reim A, Kim SY, Meima-Franke M, Termorshizen A, de Boer W, van der Putten W and Bodelier PLE (2015)

Estimulación inesperada de la captación de metano del suelo como propiedad emergente de los suelos agrícolas tras la aplicación de residuos de origen biológico. *Global Change Biology* 21: 3864-3879.

Hubbe MA, Nazhad M and Sánchez C. (2010)

El compostaje como una forma de convertir la biomasa celulósica y los residuos orgánicos putrescibles en enmiendas del suelo de alto valor: Una revisión. *BioResources* 5(4): 2808-2854.

Hubbe MA (2014)

Biodegradación de la lignocelulosa en el compostaje. En: *Composting for Sustainable Agriculture*, Maheshwari, D. K. (ed.), Vol. 3 en la serie Sustainable Development and Biodiversity, Springer, Heidelberg, Ch. 3, 43-66.

Huntingdon TG (2007)

Capacidad de agua disponible y materia orgánica del suelo. En la Enciclopedia de la Ciencia del Suelo, segunda edición. Taylor y Francis: Nueva York, publicado en línea: 12 de diciembre de 2007; 139-143.

Illera-Vives M, López-Fabal A, López-Mosqueraa ME and Ribeiroc HM (2015)

Dinámica de la mineralización en el suelo fertilizado con compost de residuos de algas marinas. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 95 (15) DOI 10.1002/jsfa.7207.

Kaza S, Yao L, Bhada-Tata P and Van Woerden F (2018)

Qué desperdicio 2.0: Una panorámica global de la gestión de los residuos sólidos hasta 2050. Serie de Desarrollo Urbano. Washington, DC: Banco Mundial. doi:10.1596/978-1-4648-1329-0.

King FH (1911)

Los granjeros de los cuarenta siglos: Agricultura orgánica en China, Corea y Japón. Libros Dover ISBN 9780486436098.

Komilis D and Ham RK (2003).

El efecto de la lignina y los azúcares en la descomposición aeróbica de los residuos sólidos. *Gestión de residuos* 23: 419-423.

Kravchenko AN, Guber AK, Razavi BS, Koestel J, Quigley MY, Robertson GP and Kuzyakov K (2019)

La huella espacial microbiana como impulsora de la estabilización del carbono del suelo. *Nature Communications* 10: 3121 Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41467-019-11057-4>

Li H, Li Y and Li C (2017)

Evolución de las sustancias húmicas durante la digestión anaeróbica de los lodos. *Revista de Ingeniería y Gestión Ambiental* 16 (7): 1577-1582

Lima CC, de Sá Mendonça E and Roig A (2010)

Contribución de las sustancias húmicas de diferentes composiciones a la síntesis de humus en un suelo tropical. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 34: 1041-1048.

Marcato C-E, Rabi M, Revel J-C, Pouech P, Hafidi M and Guirresse M (2009)

Impacto de la digestión anaeróbica en la calidad de la materia orgánica de los purines de cerdo. *International Biodeterioration & Biodegradation* 63(3): 260-266.

Minasny B and McBratney AB (2018)

Efecto limitado de la materia orgánica sobre la capacidad de agua disponible en el suelo. *European Journal of Soil Science* 69: 39-47.

Möller K (2015)

Una revisión de la literatura sobre la disponibilidad de nitrógeno del compost en relación con el Reglamento de Nitratos SI 378 de 2006. Agencia de Protección Ambiental, Wexford, Irlanda. Disponible en www.cre.ie/docs/Nitrogen%20Review.pdf (Consultado el 13 de agosto de 2019).

Moura JA, Gonzaga MIS, Da Silva TL, Guimaraes DV and De Santana IL (2017)

Los beneficios del carbono en el suelo - La gestión de los suelos para obtener múltiples beneficios económicos, sociales y ambientales. Anuario del PNUMA. Disponible en www.researchgate.net/profile/Hans_Joosten2/publication/229088148_The_Benefits_of_Soil_Carbon_Managing_soils_for_multiple_economic_social_and_environmental_benefits/links/0deec5197af3d69f26000000.pdf (Consultado el 13 de Agosto de 2019)

Noble R, Pereira N, Coventry E and Whipps J (2006)

Relaciones entre los parámetros biológicos y químicos en el compostaje de un residuo sólido municipal. Tecnología de Biorecursos 100: 4062-4065.

Ortas I, Akpinar C and Lal R (2013)

La aplicación repetida de los residuos orgánicos putrescibles afecta a la composición de la materia orgánica del suelo: Pruebas de análisis térmicos, FTIR-PAS, amino azúcares y biomarcadores de lignina. Biología y bioquímica del suelo 104: 117-127.

Pedra F, Polo A, Ribeiro A and Domingues H (2007)

El secuestro de carbono del suelo para mitigar el cambio climático: Un reexamen crítico para identificar lo verdadero y lo falso. European Journal of Soil Science 62: 42-55.

Peltre C, Gregorich EG, Bruun S, Jensen LS and Magid J (2017)

La aplicación de la literatura sobre la disponibilidad de nitrógeno del compost en relación con el Reglamento de Nitratos SI 378 de 2006. Agencia de Protección Ambiental, Wexford, Irlanda. Disponible en www.cre.ie/docs/Nitrogen%20Review.pdf (Consultado el 13 de agosto de 2019).

Pimentell D and Burgess M (2013)

La erosión del suelo amenaza la producción de alimentos. Agricultura 3: 443-463.

Powilson D S, Whitmore AP and Goulding KWT (2011)

La posibilidad de aumentar las reservas de carbono del suelo mediante la reducción de la labranza o la adición de material orgánico en Inglaterra y Gales: Un estudio de caso. Agricultura, Ecosistemas y Medio Ambiente 146: 23-33.

Powilson DS, Bhogal A, Chambers BJ, Coleman K, Macdonald AJ, Goulding KWT and Whitmore AP (2012)

La posibilidad de aumentar las reservas de carbono del suelo mediante la reducción de la labranza o la adición de material orgánico en Inglaterra y Gales: Un estudio de caso. Agricultura, Ecosistemas y Medio Ambiente 146: 23-33.

Prasad M (2009)

Una revisión de la literatura sobre la disponibilidad de nitrógeno del compost en relación con el Reglamento de Nitratos SI 378 de 2006. Agencia de Protección Ambiental, Wexford, Irlanda. Disponible en www.cre.ie/docs/Nitrogen%20Review.pdf (Consultado el 13 de agosto de 2019).

Prasad M, Lee A and Gaffney MT (2012)

Una detallada caracterización química y de nutrientes del compost y de la fibra digestiva, incluyendo una comparativa de la liberación de nitrógeno y fósforo. Rx3, Dublín. Disponible en www.cre.ie/web/wp-content/uploads/2010/12/Compost-Digestate-Characterisation.pdf (Consultado el 13 de agosto de 2019).

Rothamsted (2018)

Guía de los experimentos clásicos y otros experimentos a largo plazo, conjuntos de datos y archivo de muestras. Investigación Rothamsted. Disponible en: www.era.rothamsted.ac.uk/eradoc/OCR/Guide2018-1-60 (Consultado el 13 de agosto de 2019).

Scharlemann JP, Tanner EV, Hiederer R and Kapos V (2014)

El carbono del suelo en el mundo: comprender y gestionar la mayor reserva de carbono terrestre. Gestión del carbono 5: 81-91.

Schils R, Kuikman, P, Liski J, van Oijen M, Smith P, Webb J, Alm J, Somogyi Z, van den Akker J, Billett M, Emmett B, Evans C, Lindner M, Palosuo T, Bellamy P, Alm J, Jandi R and Hiederer R (2008)

Examen de la información existente sobre las interrelaciones entre el suelo y el cambio climático. Comisión Europea. Disponible en https://ec.europa.eu/environment/archives/soil/pdf/climsoil_report_dec_2008.pdf (Consultado el 13 de agosto de 2019).

Schmidt MW, Torn MS, Abiven S, Dittmar T, Guggenberger G, Janssens IA, Kleber M, Kögel-Knabner I, Lehmann J, Manning DAC, Nannipieri P, Rasse DP, Weiner S and Trumbore SE (2011)

Persistencia de la materia orgánica del suelo como una propiedad del ecosistema. Naturaleza 478: 49-56.

Smidt E, Binner E and Lechner P (2004)

La formación de ácidos húmicos en los compost - el papel de la actividad microbiana. En: W. Verstraete (Universidad de Gante, Bélgica): Simposio Europeo sobre Biotecnología Ambiental, ESEB 2004, 25. - - 28. Abril de 2004, Oostende/Bélgica; Actas, págs. 143 a 146; A.A. Balkema Publishers; ISBN 905809653X.

Smidt E, Meissl K, Schmutzer M and Hinterstoisser B (2008)

Co-compostaje de lignina para acumular sustancias húmicas-Estrategias en la gestión de residuos para mejorar la calidad del compost. Cultivos y productos industriales 27: 196-201.

Smith SR (2009)

Un examen crítico de la biodisponibilidad y los efectos de los metales pesados en los compuestos de residuos sólidos municipales en comparación con los lodos de depuración. Environment International 35: 142-156.

Smith P and Smith TJF (2000)

Los costos del carbono en el transporte no anulan los beneficios de las opciones de mitigación del carbono en la agricultura. Cartas de Ecología 3: 379-381.

Sodhi GPS, Beri V and Benbi DK (2009)

Uso del índice de gestión del carbono para evaluar el impacto de la aplicación del compost en los cambios del carbono del suelo después de diez años de cultivo de arroz y trigo. Comunicaciones en Ciencia del Suelo y Análisis de Plantas 40 (21): 3491 - 3502.

Tautges NE, Chiartas JL, Gaudin ACM, O'Geen AT, Herrera I and Scow KM (2019)

Los inventarios de suelos profundos revelan que los impactos de los cultivos de cobertura y el compost en el secuestro de carbono del suelo difieren en los suelos superficiales y subsuperficiales. Global Change Biology 00: 1-14.

Tejada M, García-Martínez AM and Parrado J (2009)

Relaciones entre los parámetros biológicos y químicos en el compostaje de un residuo sólido municipal. Tecnología de Biorecursos 100: 4062-4065.

Tiquia SW (2002).

Relaciones entre los parámetros biológicos y químicos en el compostaje de un residuo sólido municipal. Tecnología de Biorecursos 100: 4062-4065.

Torri SI, Corrêa RS and Renella G (2014)

El secuestro de carbono del suelo resultante de la aplicación de biosólidos. Applied and Environmental Soil Science 2014, Artículo ID 821768, 9 páginas <http://dx.doi.org/10.1155/2014/821768>.

Tuomela M, Vikman M, Hatakka A and Itävaara M (2000)

La biodegradación de la lignina en un entorno de compostaje: una revisión. Bioresource Technology 72: 169-183.

Van-Camp L, Bujarrabal B, Gentile A-R, Jones RJA, Montanarella L, Olazabal C and Selvaradjou S-K (2004)

Informes de los Grupos de Trabajo Técnicos establecidos en el marco de la Estrategia Temática para la Protección del Suelo. EUR 21319 EN/3, 872 pp. Oficina de Publicaciones Oficiales de las Comunidades Europeas, Luxemburgo.

Veeken A, Adani F, Fangueiro D and Jensen LS (2017)

Reciclaje de nutrientes: El valor de reciclar materia orgánica a los suelos - Clasificación como fertilizante orgánico o mejorador de suelos orgánicos. Grupo de Enfoque EIP-AGRI. Disponible en https://ec.europa.eu/eip/agriculture/sites/agri-eip/files/fg19_minipaper_5_value_of_organic_matter_en.pdf (Consultado el 13 de agosto de 2019).

Velasco MI, Campitelli PA, Ceppi SB and Havel J (2004)

Análisis del ácido húmico del compost de los residuos urbanos y del suelo por espectroscopia de fluorescencia. Agriscientia XXI (1): 31-38.

Victoria R, Banwart S, Black H, Ingram J, Joosten H, Milne E and Noellemeyer E (2012)

Los beneficios del carbono en el suelo - La gestión de los suelos para obtener múltiples beneficios económicos, sociales y ambientales. Anuario del PNUMA. Disponible en www.researchgate.net/profile/Hans_Joosten2/publication/229088148_The_Benefits_of_Soil_Carbon_Managing_soils_for_multiple_economic_social_and_environmental_benefits/links/0deec5197af3d69f26000000.pdf (Consultado el 13 de Agosto de 2019)

Wallace P and Brown S (2004)

Apoyar la elaboración de normas para el compost mediante la investigación de los beneficios y la eficacia del uso del compost en diferentes aplicaciones. Programa de acción sobre residuos y recursos. Disponible en www.wrap.org.uk/sites/files/wrap/LitReviewCompostBenEff1.pdf (Consultado el 13 de Agosto de 2019)

WRAP (2019)

El digestato y el compost en la agricultura (DC-Agri). Disponible en <http://www.wrap.org.uk/content/digestate-and-compost-agriculture-dc-agri> (Consultado el 9 de Julio de 2019)

WRAP (2007)

Uso de compost de calidad para beneficiar los cultivos. Disponible en www.wrap.org.uk/sites/files/wrap/15678-01%20WRAP%20Agri%20BrochureAW%20Website_0.pdf (Consultado el 13 de agosto de 2019).



Dr Jane Gilbert

Contact: jane@carbon-clarity.com

La Dra. Jane Gilbert es una ecologista colegiada y profesional de la gestión de residuos y ha estado involucrada en el sector del reciclaje de productos orgánicos durante más de veinte años.

Es la ex directora general de la Asociación de Compostaje del Reino Unido, cofundadora de la Red Europea de Compostaje y vicepresidenta del Grupo de Trabajo sobre Tratamiento Biológico de la Asociación Internacional de Residuos Sólidos.

Jane se formó originalmente como microbióloga (BSc Hons), tiene un doctorado (PhD) en bioquímica y un Master en Administración de Empresas

(MBA). Se desempeña como Carbon Clarity, proporcionando servicios de consultoría, capacitación y redacción.

Jane es autora de varios libros técnicos de compostaje y ha realizado presentaciones en conferencias en América del Norte, Europa, África y Asia. Dirige Carbon Clarity Press, especializada en la publicación de recursos para apoyar la vida sostenible.



Marco Ricci – Jürgensen

Contact: info@altereko.it

Presidente del Grupo de Trabajo de ISWA sobre el tratamiento biológico de los residuos, encargado de la consultoría Altereko sas, experto superior de CIC - Asociación Italiana de Compostaje y Biogás.

Tiene 20 años de experiencia en la planificación de la gestión de los RSU, el diseño de planes de recogida mediante la minimización de los residuos restantes, la evaluación de las instalaciones de reciclaje (centradas en el compostaje), la planificación de iniciativas de comunicación, la presidencia de grupos de trabajo o proyectos multilingües y multitarea. Con un compromiso específico para soluciones de RSU en las ciudades, apoyó a la ciudad de Milán (Italia) en

el establecimiento del plan de reciclaje de residuos de alimentos en 2012 y trabajó con la Mega-Ciudad de Sao Paulo (Brasil) para la estrategia de desviar los residuos orgánicos putrescibles de los basurales hacia el reciclaje en cooperación con ABRELPE y UN-CCAC.





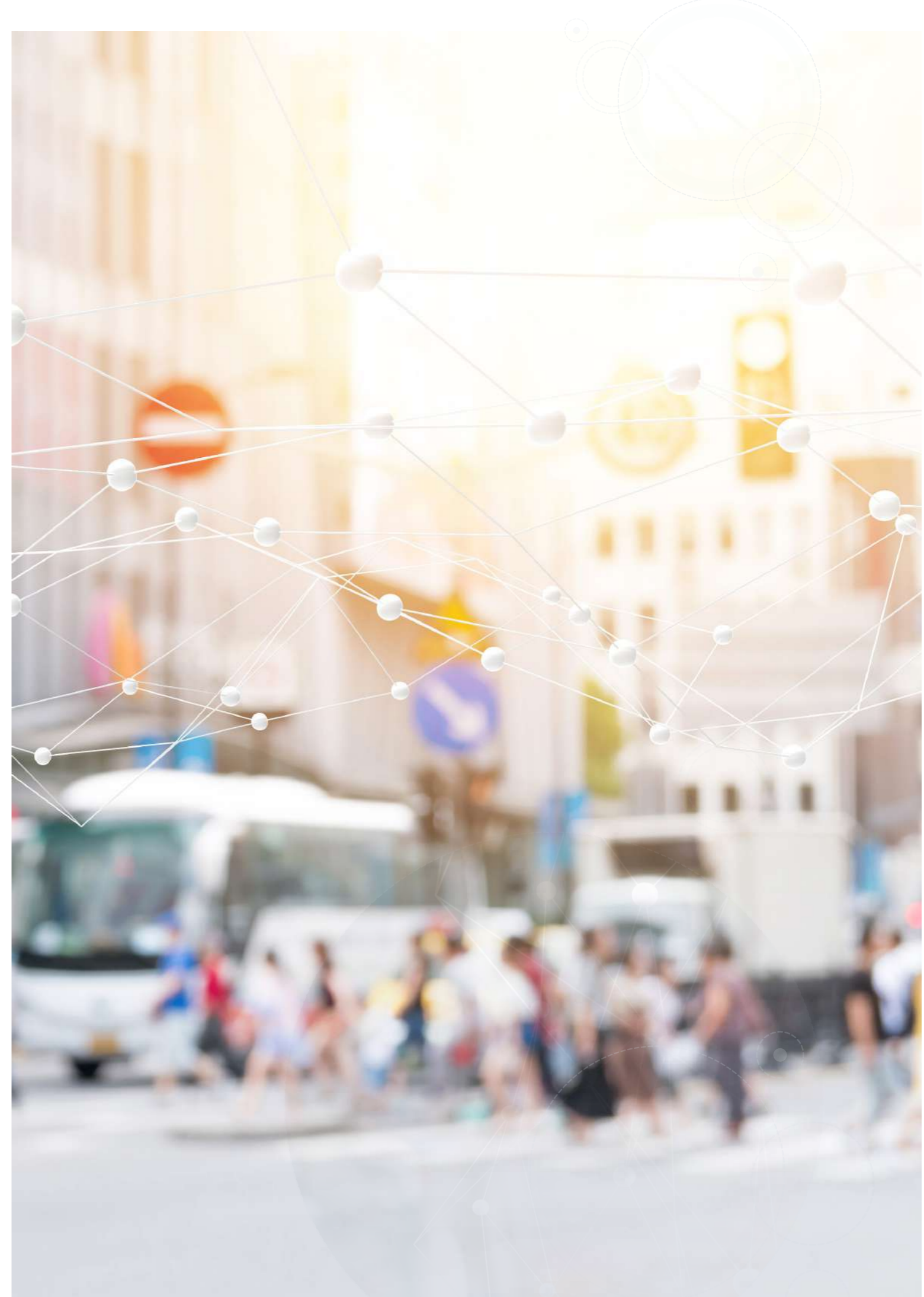
Aditi Ramola

Contact: aramola@iswa.org

Aditi es actualmente la Directora Técnica de la Asociación Internacional de Residuos Sólidos (ISWA), donde gestiona proyectos internacionales y asociaciones con la ONU, proporciona asistencia a los Grupos de Trabajo de ISWA y ayuda a desarrollar proyectos innovadores a nivel mundial para fortalecer aún más la cooperación con los socios de ISWA y las organizaciones internacionales.

Sus habilidades están particularmente enfocadas a la gestión de los residuos sólidos y las cuestiones ambientales. Aditi obtuvo una maestría en Tecnología Ambiental y Asuntos Internacionales de la Universidad Tecnológica de Viena. Cuenta con varios años de experiencia en el sector privado, incluyendo en Caterpillar Inc. antes de

incorporarse a la Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI) en la unidad de Política y Redes Climáticas. Aditi fue la Presidenta del Grupo de Jóvenes Profesionales de ISWA para 2019. También es una apasionada de la educación científica y actualmente dirige la iniciativa de los YPGs de ISWA sobre Educación.



PONTE EN CONTACTO Y SIGUE A ISWA



Dirección:

ISWA

International Solid Waste Association
Stationsplein 45 A4.004
3013 AK Rotterdam
The Netherlands



Teléfono:

+31 10 808 3990



Email:

iswa@iswa.org



Web:

www.iswa.org



Facebook:

[@ISWA.org](https://www.facebook.com/ISWA.org)



Twitter:

[@ISWA_org](https://twitter.com/ISWA_org)



LinkedIn:

www.linkedin.com/company/iswa-international-solid-waste-association



International Solid Waste Association

Para mayor información sobre el presente informe, por favor
pongase en contacto con el Sr. Daniel Purchase
Membresía y Comunicaciones

dpurchase@iswa.org

Copyright: ISWA – International
Solid Waste Association
Design and Artwork: hellofluid.co.uk
© ISWA 2020
Traducción al español por ARS
Miembro Nacional de ISWA en
Argentina. M. Soledad Garavelli