

AVANCES EN EL CONOCIMIENTO DE LA DINÁMICA DE LA MATERIA ORGÁNICA DENTRO DE UN CONTEXTO AGROECOLÓGICO

Juana Labrador

Departamento de Biología Vegetal, Ecología y Ciencias de la Tierra. Escuela de Ingenierías Agrarias. Universidad de Extremadura. Badajoz. Email: labrador@unex.es.

Resumen

La materia orgánica representa la principal reserva edáfica de carbono. Su participación en moléculas que poseen composición y propiedades diferenciadas, le hacen responsable de actividades fundamentales en el suelo; su colaboración en y con la vida edáfica crean un conjunto de propiedades emergentes que generan resiliencia, conservación y promueven la fertilidad, productividad y la biodiversidad de los suelos. A pesar de la evidencia histórica de su importancia, el reconocimiento de su papel en la dinámica del suelo ha sido fluctuante y ha estado unido a las incertidumbres procedentes del conocimiento científico y de contextos culturales cambiantes, dándose en los últimos cincuenta años, los mayores avances en el conocimiento de su naturaleza y de sus funciones gracias a los progresos en ecología microbiana y en los procesos analíticos e instrumentales. Paradójicamente, a pesar de éstos avances, el paradigma agronómico, ha asumido de forma sesgada su papel traduciendo sus múltiples funciones a un balance simplista de unidades fertilizantes. Por el momento sólo la agroecología mantiene un marco teórico robusto y abierto a nuevas aportaciones desde el conocimiento científico y experimental, que reconoce la multifuncionalidad de la materia orgánica en los agrosistemas y los expresa en prácticas y manejos de enorme eficiencia agrosistémica.

Palabras clave: Ecología del suelo, fertilidad, dinámica de la materia orgánica, evolución historia de la materia orgánica.

Summary

Advances in the knowledge of the dynamics of the organic matter within a agro-ecological context

Organic matter is the main soil carbon reserves; It's participation in molecules with different composition and properties, are responsible for key activities in the soil; it's collaboration in and with the soil life generates a set of emergent properties that gives resilience, promote conservation, fertility, productivity and biodiversity in the soil. Despite the historical evidence of its relevance, the recognition of this role in soil dynamics has fluctuated, and linked to the uncertainties of the scientific knowledge and the changing cultural contexts; and major advances in the knowledge of its nature and functions have occurred in the last fifty years, thanks to the progress in microbiological Ecology and in the analytical and instruments processes. Paradoxically, despite these advances, agronomic paradigm has assumed its role in a biased way by translating its multiple functions to a simple fertilizer units balance. At the moment only the Agroecology maintains a robust theoretical framework, open to further input from the scientific and experimental knowledge, which recognizes the multifunctionality of Organic Matter in agroecosystems which are expressed in management practices with a huge agrosystemic efficiency

Key words: Soil Ecology, fertility, dynamics of the organic matter, Historical evolution of soil organic matter.

Introducción

Las incertidumbres ligadas a la definición y al conocimiento de la naturaleza y las funciones de la materia orgánica del suelo (MOS) en los últimos tres siglos son el

resultado de un proceso endógeno inherente a la evolución de la ciencia de suelo, unido al producto de una construcción social¹, ya que la conceptualización de la

1 Aunque nos pueda parecer extraño tales vicisitudes no sorprenden a historiadores ni a sociólogos que están

materia orgánica está ligado a la noción más compleja de fertilidad del suelo y a la percepción cambiante del medio ambiente por el ser humano, (Manlay *et al.* 2007).

Desde el concepto de humus² dado por los escritores romanos (Virgilio, Plinio el viejo y Colummela), que aludía al término «el suelo» o «la tierra»: a la primera definición que contempla la conexión con la historia de la humanidad y su dimensión multifuncional dada por (Waksman 1938) en su obra «*Humus: origen, composición química e importancia en la naturaleza*» que consideraba al humus como «una fuente de abundancia humana en este planeta» hasta el reconocimiento más actual de su incuestionable papel en la fertilidad del suelo (Primavesi 1980, Schnitzer 1991, Tiessen *et al.* 1994, Labrador 2001, Manlay *et al.* 2007), en el control de plagas y enfermedades (Altieri y Nicholls 2003, Barrés *et al.* 2007, Bello *et al.* 2008, Nicholl 2010); en el control de la erosión (Morgan 1997, Kalbitz *et al.* 2003, Ellies 2004) en el aumento de la biodiversidad edáfica (Hole *et al.* 2005, Lavelle *et al.* 2006, Barrios 2007, Cagnolo y Valladares 2011) o su importancia en procesos globales el cambio climático, la regulación del ciclo del nitrógeno o la calidad del agua (Vallejo *et al.* 2005, FiBL 2007, Lal 2007, Jastrow *et al.* 2007, Galloway *et al.* 2008, Evanylo *et al.* 2008) ha habido una serie de paréntesis conceptuales importantes.

Según Manlay *et al.* (2007), históricamente podemos distinguir tres periodos en el proceso de conceptualización de la MOS: el período «húmico» -antes de 1840-; el período «mineralista» -con las fechas aproximadas de 1840-1940- y el período «ecológico» a partir de 1940 y hasta el presente. Los primeros dos periodos están estrechamente vinculados a la evolución de las teorías sobre la nutrición de la planta mientras que el tercero está caracterizado por cuantificar los «servicios» de la materia orgánica ampliándolos a la sostenibilidad del ecosistema y al bienestar humano.

En el período «húmico» -hasta 1840-, los estudiosos pensaban que la materia seca de la planta derivaba principalmente de la absorción de la materia suministrada por la MOS que fue llamado «humus» en aquel momento. Los agrónomos que defendieron ésta teoría basaron la gerencia de la fertilidad de los sistemas de cultivo, en la gerencia del humus -por ejemplo a través de aportes de abonos orgánicos-. Thaër en 1809, propu-

so una “teoría de humus” considerándolo como un componente del suelo; ésta teoría tendría mucha influencia en los años siguientes, aportando la idea de balance y cuantificando la continuidad agronómica y económica de los sistemas de cultivo a través la gestión orgánica.

En el periodo «mineralista» -a partir de 1840 y hasta 1940 aproximadamente-, con Liebig (1840) y su «teoría mineral de la nutrición», se abandonó progresivamente el reciclaje de nutrientes a partir de la MOS, abriendo camino a los procesos de la industria química de la producción de fertilizantes de síntesis y facilitando el camino a la fertilización mineral intensiva como sustituto de las prácticas orgánicas.

En su obra *Chemie Organique appliquée à la Physiologie Végétale et à l'Agriculture* -punto de partida de la Química Agrícola- desarrolló conceptos básicos sobre la fertilización y la nutrición mineral de los vegetales, demostró que las plantas no se nutren de humus, sino de soluciones minerales y que el humus es un producto transitorio entre la materia orgánica vegetal y las sales minerales, únicos alimentos de las plantas.

Evidentemente, en este periodo la comprensión del funcionamiento biológico del suelo y las implicaciones de la interrelación de la MOS con otros componentes del suelo, tenía poco impacto en la gestión agraria, ajustada a los nuevos modelos basados en la fertilización mineral.

En el periodo denominado por Manlay «ecológico», a partir de los años 40, observamos la valorización de la MOS desde bases completamente distantes. Por una parte la MOS iba paulatinamente ganando reconocimiento científico, considerándola como un sistema complejo, y como un indicador de la calidad del suelo y la fertilidad de los agroecosistemas por otra, sobre todo para muchos autores ligados al futuro movimiento orgánico -como Rusch³ 1972- todavía era poco el reconocimiento ya que el concepto de “humus” había sido históricamente deteriorado pasando de ser «la creación de un proceso biológico a un mero residuo de un proceso».

Sea como sea, éste periodo en el que nos encontramos, es el que más repercusiones está teniendo en la valorización de la MOS y en la mejora de su gerencia, a pesar de la enorme distancia conceptual que todavía existe entre la visión y la misión agroecológica de la MO y la visión agronómica convencional de la misma.

Así por ejemplo la materia orgánica está considerada por la Ciencia del Suelo «como un componente principal que regula la capacidad del mismo para mantener su fertilidad así como para optimizar su conservación,

acostumbrados a la complejidad del análisis conceptual de construcciones como la fertilidad. De hecho reconocen este tipo de procesos como la interacción compleja entre los elementos de la producción cognoscitiva, y el contexto social, incluyendo factores económicos y políticos e ideologías, y la percepción cultural del ambiente -entre corriente principal o alternativa (Latour 1988, Boulaïne 1989).

2 La etimología de la palabra “humus” es latina, y se ha utilizado históricamente para describir tres conceptos substancialmente diversos: humus como componente químico, humus como horizonte y con menos frecuencia, humus como principio (Feller y Boulaïne 1987).

3 Para Rusch el humus era un principio, una fuerza original, la fuerza impulsora de la fertilidad. En su obra «La fertilidad del suelo», Rusch describe el humus como «un tejido primitivo vivo, una forma original compuesta de una congregación de sustancias minerales, orgánicas y vivas...es el poder biológico y funcional de las sustancias vivientes para organizar los restos de nuevo a la vida en una nueva armonía».

además de ofrecer servicios ambientales que permiten sostener al ser humano en el ámbito local y a escalas globales».

Sin embargo, esta conceptualización no es aceptada plenamente por la agronomía -que es la responsable final de su gerencia en los sistemas productivos-, ni traducida a técnicas de gestión de la MOS en su modelo de producción mayoritario -la agricultura industrial-.

Las consecuencias de este, dicho con retórica, «exceso de ignorancia» son enormes: impactos a menudo irreversibles, ocasionados -a nivel agroambiental y socioeconómico- por su déficit, por su escasa calidad o por la mala gestión de la MOS hace que en el contexto agrario actual y bajo la rúbrica de una agricultura verdaderamente perdurable sea enormemente necesario elaborar otro marco teórico que exprese plenamente la multifuncionalidad de la materia orgánica en los agrosistemas⁴ -sin perder de vista que el enfoque está en el suelo como recurso esencial y en la vida que este mantiene- y reorientar de nuevo, el papel de la materia orgánica, para su gerencia desde bases agroecológicas aprovechando los avances científicos y los conocimientos experimentales adquiridos y en un contexto social más propicio.

Estos nuevos planteamientos, son difícilmente realizables desde el paradigma agronómico actual, basado mayoritariamente en enfoques "mineralistas" en relación a la fertilización y la vida del suelo, ni desde un modelo de investigación y transferencia de tecnología que incorpora sesgos importantes -mayoritariamente relacionados con la MOS como productora de elementos minerales-; con el olvido intencionado del conocimiento tradicional sobre el manejo de la MOS y por supuesto que ni se plantea la necesidad de un abordaje multidisciplinar a la hora de estudiar la MOS en su interrelación con los componentes ambientales, económicos y culturales de los sistemas productivos (Astier *et al.* 2008).

En el escenario actual sólo la agroecología, ha sentado las bases de lo que significa para la agricultura una percepción global del mundo orgánico -percepción que no termina en los sistemas productivos- (Labrador *et al.* 2009), retomando los avances en el conocimiento y funciones de la MOS y abordando en consecuencia, desde una visión interdisciplinar⁵, el diseño de modelos de gestión agrosistémica basados preferentemente en el manejo de la biodi-

versidad y en la gerencia de la materia orgánica; poniendo en evidencia cómo si es posible un equilibrio perdurable entre producción, calidad de las producciones, conservación de los recursos y desarrollo sostenible.

1. Una aproximación conceptual a la materia orgánica del suelo

El carbono orgánico del suelo (COS) es un componente importante del ciclo global del C, ocupando un 69,8 % del C orgánico de la biosfera, de hecho, los suelos contienen más C que la suma del carbono existente en la vegetación y en la atmósfera (Swift 2001).

El carbono en los suelos⁶ puede encontrarse en forma orgánica e inorgánica; pudiendo actuar el suelo como fuente de carbono por difusión directa hacia la atmósfera -en forma de CO₂ producido por la mineralización de la MOS o como CH₄- y como reservorio de carbono -dentro de las distintas fracciones de la MOS y mayoritariamente en forma de carbonatos cuando se trata de carbono inorgánico-; el equilibrio o el predominio de una u otra va a depender de muchos factores pero mayoritariamente del manejo del suelo (Reicosky 2002).

Al ser el COS el principal elemento de la MOS es común que ambos términos se confundan o que se hable indistintamente de uno o de otro (Martínez *et al.* 2008). Al respecto cabe señalar que los métodos analíticos determinan directamente el COS mediante calcinación húmeda o seca, mientras que la MOS se estima a partir del COS multiplicando por factores empíricos⁷ como el de van Benmelen equivalente a 1,724.

Por lo tanto a pesar de que sería más adecuado hablar de carbono orgánico del suelo, utilizaré el término MOS por ser más utilizado en la práctica agronómica.

Y es en este contexto agrosistémico en el cual definimos la materia orgánica del suelo -MOS- como: «el material orgánico de origen biológico, que procede de alteraciones bioquímicas de los restos de animales, plantas y microorganismos y de compuestos procedentes del metabolismo vegetal y microbiano; que puede encontrarse en el interior del suelo, localizada inter e intra-

4 Esta denominación, hace referencia al resultado de la intervención humana sobre un ecosistema con fines productivos, siguiendo diferentes modelos de gestión, que son consecuencia, de una gran diversidad de esquemas culturales, técnicos, económicos o ambientales. Una gran información sobre ecología de los sistemas agrarios la encontramos en Gómez Sal (2001) y en Gliessman (2002).

5 El concepto de interdisciplinariedad es abordado como una manera de generar interrelaciones entre disciplinas diferentes... y de generar nuevos campos válidos de interpretación, de diversos fenómenos que atañen al hombre y a la naturaleza que en esencia son complejos (León Sicard 2009)

6 La cantidad total de C orgánico (CO) almacenada en los suelos ha sido estimada por diversos métodos y su valor es cercano a 1.500 Pg a 1 m de profundidad. (Swift 2001) Estimaciones de C inorgánico (CI) dan valores de alrededor de 1.700 Pg, principalmente en formas estables como CaCO₃ y MgCO₃ · CaCO₃, CO₂, HCO₃⁻ y CO₃⁼ (Swift 2001). Tan solo recientemente, el secuestro de CI del suelo mayoritariamente en forma de carbonatos ha comenzado a despertar la atención de los expertos, más cuando se ha comprobado como mientras los ambientes húmedos son potenciales secuestradores de CO los ambientes áridos y semiáridos cumplen una función semejante con el CI.

7 Como existe una considerable variación entre diferentes suelos y horizontes en el factor de conversión COS - MOS, es preferible informar el valor de COS sin convertir (Martínez *et al.* 2008)

agregados y en la solución; y/o en la superficie del suelo y que presenta distintos estados de transformación derivados de la dinámica del medio vivo, de las interacciones con el medio mineral, de los factores ambientales, del tipo de suelo y de las prácticas de manejo».

Es una fracción compleja y heterogénea, con una dinámica propia ligada a la actividad del medio vivo y a su mayor o menor estabilización en la fracción mineral, e integrada por numerosos componentes, con diversos grados de alteración, complejidad y estado y con diferente ubicación.

A pesar de que la mayor parte de la MOS procede de restos vegetales, todos los constituyentes de las plantas, de animales y de la biota edáfica pasan al suelo en algún momento, aunque su existencia en el mismo suele ser transitoria. Algunos componentes son más resistentes a la degradación y pueden acumularse, -hasta cierto punto, ya que las condiciones de escasez de carbono y la flexibilidad bioquímica de la población del suelo, aseguran que no se produzca una gran acumulación de material biodegradable-.

Mayoritariamente la transformación de la materia orgánica en el suelo depende de la velocidad a la que es usada por los microorganismos y ésta actividad depende a su vez de la composición del sustrato, de la accesibilidad al mismo, y de factores ambientales, edáficos y evidentemente antrópicos -fundamentalmente si se trata de agrosistemas-

En suelos agrícolas bien estructurados y provistos de MO la procedencia de la materia orgánica mayoritariamente queda resumida en el cuadro 1.

Cuadro 1. Procedencia de la materia orgánica en suelos agrícolas orgánicos

biomasa	Componentes vivos -vegetales, animales, macro y microorganismos- presentes en el medio edáfico
necromasa	Contenidos y estructuras celulares, en diferentes estados de transformación, procedentes de la biomasa vegetal, microbiana y animal que viven en y sobre el suelo al morir
copromasa	Restos procedentes de la digestión animal, de diverso tamaño, transformación y composición
señales	Sustancias orgánicas de uso y actividad biológico-funcional, que controlan las relaciones entre los organismos del suelo o entre éstos y las raíces -ej. fitoalexinas, bacterio-toxinas, antibióticos, micotoxinas-
secrecciones	Sustancias orgánicas generadas y depositadas por vegetales, animales y microorganismos del suelo; utilizadas con fines constructivos, nutricionales y defensivos en el ámbito de la rizosfera -ej. Rizodepósitos-
neomasa	productos orgánicos neoformados en el suelo -sustancias húmicas-

Adaptado de Gonzalez Carcedo (2007)

La gran diversidad en los orígenes hace que la MOS no sea homogénea en su composición -aunque presenta una manifiesta regularidad en sus componentes-.

En la actualidad son numerosas y complejas las clasificaciones utilizadas para describir su comportamiento y funcionalidad en el suelo. Los métodos de fraccionamiento físico separan el material orgánico del suelo basándose en el tamaño de partícula y en la densidad -tamizado, sedimentación y densitometría- (Elliot y Cambardella 1991). El fraccionamiento físico del suelo destaca el papel de la asociación de la MO con el medio mineral, la importancia de su composición y de la localización de la MOS, al mismo tiempo tratan de evitar cambios químicos en el análisis de la MOS. Los métodos de fraccionamiento químico determinan los componentes moleculares de la MOS así como la interacción de éstos con otros componentes orgánicos del suelo. Las técnicas biológicas son usadas para caracterizar la biodegradabilidad de la MOS cuantificando el tamaño y la dinámica de los diferentes pools -depósitos- de MOS.

Una de las clasificaciones más sencillas (Cuadro 2), pero a la vez muy didáctica, es aquella que divide la materia orgánica del suelo en dos fracciones, la materia orgánica "viva" y la materia orgánica "no viva" (Coleman *et al.* 1998).

Cuadro 2. División de la materia orgánica del suelo

Materia orgánica viva	<ul style="list-style-type: none"> Formada por la biomasa macro y microbiana y las raíces de las plantas. En esta fracción los macro y microorganismos son componentes y al mismo tiempo participan en la descomposición y transformación de los restos orgánicos.
Materia orgánica "no viva"	<ul style="list-style-type: none"> Formada por materiales orgánicos poco transformados y compuestos orgánicos simples y por macromoléculas producto de la síntesis y/o del metabolismo microbiano. Destacamos dos subgrupos: <ul style="list-style-type: none"> la fracción "no húmica" constituida por componentes orgánicos resultantes de la biotransformación de los restos orgánicos, de las excrecciones radiculares y de los compuestos orgánicos producidos por síntesis y/o metabolismo microbiano, bioquímicamente identificables, siendo la mayoría fácilmente biodegradables la fracción "húmica" constituida por macromoléculas complejas resultado de los procesos de humificación denominadas sustancias húmicas; forman parte integral del suelo en relación con su unión al medio mineral y no pueden ser separados por métodos mecánicos

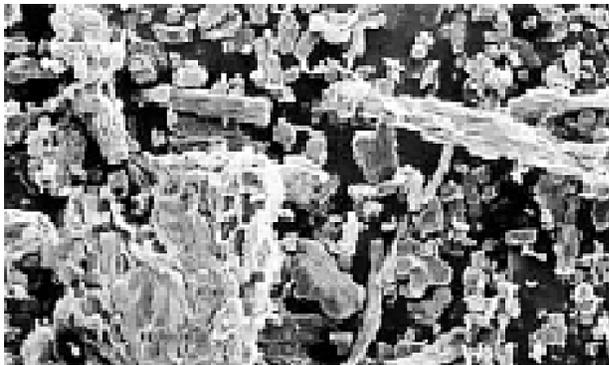
Adaptado de Coleman *et al.* (1998)

Ampliando la clasificación anterior, Baldock *et al.* (1999), asumen la clasificación de Coleman, agrupando los componentes de la fracción "no viva" en cuatro subgrupos:

Materia orgánica disuelta –MOD–. Conjunto de moléculas orgánicas de diferente tamaño y composición que pasan por un filtro de 0.45 μm de poro. Existe en suelos estructurados en diferentes espacios porosos y formando parte de distintos componentes del suelo (Zsolnay 2002). Es la fracción dominante sobre la que actuaría la actividad de los microorganismos (Marschner y Kalbitz 2003).



Materia orgánica particulada. Fracción sólida de la materia orgánica -mayor de 50 μm - de gran biodegradabilidad, derivada mayoritariamente del material vegetal. Es fuente energética para la biota edáfica, mantiene las características químicas de su material original y es un buen indicador biológico de los efectos producidos con el manejo del suelo.



Materia orgánica humificada. Mezcla de materiales orgánicos -asociados o no a partículas minerales- que forman biomoléculas complejas de elevado peso molecular. Su fraccionamiento químico da lugar a ácidos húmicos, fúlvicos y huminas. Es la fracción orgánica más abundante del ambiente terrestre (Hayes y Clapp 2001); siendo las huminas el componente mayoritario.



Materia orgánica inerte. Mezcla de materiales orgánicos insolubles y altamente recalcitrantes. Tienen un importante papel en la termicidad del suelo. Presentan en su composición constituyentes no húmicos como largas cadenas de hidrocarburos, ésteres, ácidos y estructuras polares, que pueden ser de origen microbiano -como polisacáridos y glomalina- íntimamente asociados a los minerales del suelo (Hayes y Clapp 2001).



La separación de las distintas fracciones de la MO permite cuantificar el carbono en una serie de constituyentes: solubles, particulados y coloidales. Cada uno de éstos componentes, dará una información precisa para el manejo agrosistémico⁸ ya que tendrá un papel concreto sobre una determinada «función» del suelo, siendo esta función, la mayoría de las veces, reforzada por la interacción de los distintos componentes

2. La dinámica de la complejidad

Desde el prisma de la cinética de evolución de los compuestos orgánicos en el suelo encontramos distintos almacenes de carbono o pools -grupos moleculares diferentes, asociados a una velocidad de transformación similar-, con distintas cinéticas de evolución, lenta, media o rápida así como fracciones de compuestos orgánicos -proteínas, carbohidratos, polifenoles...- que pueden participar en uno o en varios pools.

Los cambios bioquímicos que se producen a lo largo del proceso de transformación de la MO en agrosistemas se reflejarán en variaciones en las características moleculares de los compuestos de carbono; en procesos de

8 Por ejemplo, la relación CO lábil/C total es un indicador del efecto de diferentes sistemas productivos sobre la fracción orgánica del suelo (Galantini 2002). La razón entre la concentración de CO en la fracción arcilla-limo y el CO total, o factor de enriquecimiento de C, permite estudiar el almacenamiento de C en suelos con distinto historial de manejo. La «razón de estratificación» de la MOS es otro indicador de calidad de suelos propuesto por Franzluebbers (2001) basado en el hecho que los suelos naturales de pradera o forestales tienen sus propiedades estratificadas en profundidad y éstas están relacionadas con la cantidad de MO en los distintos estratos de la denominada capa arable

neoformación de compuestos carbonados y en múltiples interacciones con el medio mineral (Cuadro 3).

Cuadro 3. Definiciones de algunos de los procesos relacionados con la dinámica del carbono orgánico en el suelo

Deposición	Adición de carbono orgánico en múltiples formas a la fracción orgánica del suelo
Descomposición	Proceso de transformación física y degradación bioquímica de materiales orgánicos de origen animal, microbiano o vegetal en y sobre el suelo
Alteración	Conversión de algunas estructuras del carbono orgánico en otras diferentes como resultado de ataques enzimáticos y reacciones químicas
Mineralización	Conversión del carbono orgánico a dióxido de carbono a través del metabolismo respiratorio
Inmovilización	Asimilación de los componentes inorgánicos por los microorganismos para incorporarlos en su biomasa. Éstos retornarán de nuevo al suelo al ser biodegradadas
Asimilación	Incorporación del carbono orgánico en el interior de los tejidos y células de los organismos descomponedores

Adaptado de Gonzalez Carcedo (2007)

En condiciones aeróbicas, podríamos mostrar esta dinámica en tres secuencias que se pueden alterar mayoritariamente por los procesos que aceleran o retardan la actividad macro y microbiana (Cuadro 4).

Cuadro 4. Dinámica secuencial de la transformación de la materia orgánica en el suelo

<ul style="list-style-type: none"> • La deposición de restos orgánicos de composición química heterogénea, procedentes mayoritariamente de plantas, de deyecciones de animales y macroorganismos, así como los compuestos de carbono producidos por el metabolismo vegetal y microbiano y por la lisis celular. • La descomposición y la neoformación de compuestos orgánicos, como consecuencia de la actividad saprofítica, y de reacciones bioquímicas a través de sistemas endo y exoenzimáticos así como a través de reacciones abióticas. La neoformación ofrece la formación de nuevas moléculas y macromoléculas con propiedades específicas. • La redistribución física y la estabilización del carbono mediante el transporte, la absorción y la agregación en las partículas del suelo.
--

En cierta manera la dinámica de la materia orgánica en el suelo, su variación espacial y temporal en los agrosistemas y su respuesta a las perturbaciones se pueden entender con la interacción de estos tres apartados. Veámoslos más detenidamente.

2.1. Deposición en superficie y en el interior del suelo de compuestos carbonados

Kluyver (1956) en su libro *The Microbe's Contribution to Biology*, propuso la idea de la "unidad bioquímica de

la vida" afirmando «que toda la vida estaba conectada por el reciclado de la materia y todos los organismos estaban conectados a través de la red de los ecosistemas». En este sentido el papel del suelo, como reciclador de la biomasa y necromasa a través de los organismos edáficos es un claro ejemplo de lo postulado por Kluyver.

En los suelos cultivados los grupos tróficos que predominan son los detritívoros en un 60 a 90%, seguidos por los herbívoros con menos del 30%, mientras que depredadores o parásitos no sobrepasan el 20%.

Los organismos viven en un mosaico espacial de condiciones físicas con variaciones en la composición y abundancia de los recursos. Numerosos estudios han demostrado que la metaestabilidad del suelo está ligada directamente a la abundancia y complejidad de las redes tróficas que sustenta⁹ y la base de estas redes tróficas es mayoritariamente la materia orgánica en todas sus formas

Las estructuras biológicas que forman la necromasa –como los componentes del citosol, de los tejidos conductivos, del exoesqueleto de insectos, del glucocáliz bacteriano, de los rizodepósitos, etc- presentan distinta complejidad bioquímica-, por lo tanto la gestión metabólica de los mismos –biodegradabilidad- también presenta distinta velocidad de alteración

En el caso de la hojarasca, ésta no sólo es útil como alimento, sino que tiene una reconocida eficiencia como hábitat ya que modifica la humedad, la luz, la temperatura e incluso la velocidad del viento lo que implica su influencia sobre la composición de los macroherbívoros superficial.

La diversidad de componentes es, en palabras de Gonzalo Carcedo (2007) «una inmensa diversidad de fuentes potenciales de energía que propicia una extraordinaria diversidad funcional, materializada en los organismos del suelo» (Cuadro 5).

Otros compuestos orgánicos producidos y «depositados» en y sobre el suelo son los procedentes de la copromasa. La excreción de la macrofauna dota al suelo de una parte muy importante de materia orgánica alterada físicamente, química y enzimáticamente, enriquecida con mucopolisacáridos "intestinales", con bacterias y esporas, con elevada capacidad de retención de agua.

Una importante fuente de materia orgánica en el interior del suelo es la rizosfera, definida como «la zona de influencia de las raíces de las plantas sobre la microbiota del suelo, con propiedades físicas, químicas y biológicas diferentes de las que caracterizan a un suelo libre de cualquier sistema radical» (Bowen y Rovira 1999).

Se ha comprobado igualmente, cómo la calidad de las raíces influye en la densidad, actividad y distribución de detritívoros y herbívoros edáficos (Wardle y Lavelle 1997). La raíz suministra a la microbiota asociada, fuen-

9 Hay dos aspectos esenciales que afectan a la estructura y función de los ecosistemas y agrosistemas: una es la pérdida de biodiversidad asociada a la eliminación de especies, y dos la fragmentación de la red trófica en subredes desconectadas entre sí.

tes de carbono en forma de fotosintatos y material vegetal degradado. La liberación de material orgánico se produce mediante la excreción de exudados, actuando como señales y/o sustratos de crecimiento para los microorganismos del entorno. Una vez que la población microbiana se establece, el desarrollo de la rizosfera queda bajo la influencia de los cambios ocasionados en la raíz previamente inducidos por los microorganismos y por su aporte de nutrientes a la planta, que a su vez modifica la calidad y cantidad de los exudados radicales¹⁰.

Cuadro 5. Componentes bioquímicos del material vegetal

Hidratos de carbono: Pentosas (arabinosa, xilosa) Hexosas (glucosa, fructosa) Oligosacáridos (sacarosa, maltosa) Polisacáridos (almidón, celulosa) Polisacáridos (arabanas, galactanas, xilanas) Polisacáridos (sustancias pépticas)
Glucósidos (glucosa+alcohol; glucosa+fenol; glucosa+aldehído).
Ácidos orgánicos, sales, ésteres (ácido oxálico, cítrico, málico...)
Lípidos y compuestos afines (Grasas, aceites, ceras, aceites esenciales).
Compuestos nitrogenados (Proteínas, aminoácidos, aminas, ácidos nucleicos, purinas, pirimidinas, alcaloides, bases orgánicas).
Pigmentos (Clorofilas, carotenos, antocianinas).
Ligninas (Polímeros derivados del fenilpropano)
Taninos (Complejos fenólicos)
Resinas.
Vitaminas, fitoreguladores y antibióticos.
Compuestos minerales y Otros

Adaptado de Urbano Terrón (1998)

Puede haber diferencias en la estructura molecular de las macropartículas de carbono causadas por las diferencias en la composición de los sustratos orgánicos aportados, estas diferencias se reducen en las fracciones de carbono más pequeñas que consisten sobre todo en carbono procesado por los microorganismos

2.2. La alteración y la neoformación de los compuestos orgánicos

La transformación de materiales orgánicos en moléculas más simples es uno de los servicios más importantes para los ecosistemas realizado por los organismos del suelo, pues representa el complemento catabólico de la fotosíntesis -que supone el anabolismo o síntesis de los compuestos carbonados-

Constituye un proceso ecosistémico de importancia comparable a la producción primaria (Moorhead *et al.* 1996). De esta manera, la interacción entre las plantas y la biota edáfica se puede entender como un gran mutualismo en el que las plantas proporcionan el carbono para la biota edáfica y ésta devuelve los nutrientes necesarios para mantener la producción primaria (De la Peña 2009). Así, la descomposición completa los ciclos biogeoquímicos iniciados por los procesos fotosintéticos o quimiosintéticos.

Sin embargo la descomposición no es simplemente el proceso inverso a la producción primaria. La producción primaria es un proceso que, en última instancia, reside y se desarrolla en cada organismo productor de forma individual, mientras que la descomposición se manifiesta al nivel de la comunidad, siendo un proceso compuesto e integrador cuyos mecanismos de funcionamiento varían entre distintos sistemas y con la escala de análisis, constituyendo probablemente el proceso ecológico más complejo de la biosfera (Sinsabaugh y Foreman 2003).

2.2.1. Responsables bióticos de la dinámica

En el ecosistema edáfico, los microorganismos son los organismos responsables de una parte importante del metabolismo aerobio y de todo el metabolismo anaerobio gracias a su gran ubicuidad (Cuadro 6). De este modo, controlan las tasas de reciclado de nutrientes, a una escala global, de forma directa mediante degradación hidrolítica de los compuestos orgánicos, o indirecta modificando la disponibilidad de los nutrientes.

Cuadro 6. Características principales relacionadas con la ubicuidad de los microorganismos

Pequeño tamaño	Les permite una gran capacidad de dispersión
Variabilidad	Les permite ocupar nichos ecológicos muy diversos
Flexibilidad metabólica	les permite tolerar y adaptarse rápidamente a condiciones ambientales desfavorables
Plasticidad genética	les permite recombinar y recolectar los caracteres favorables
capacidad de anabiosis	les permite persistir largo tiempo adaptándose a condiciones ambientales cambiantes

Adaptado de Guerrero y Berlanga (2003)

Los microorganismos heterotróficos mayoritarios en el suelo, constituyen los organismos descomponedores más importantes y son la base de las cadenas tróficas detritívoras. De esta manera, la diversidad, la actividad, la abundancia y distribución de la mayor parte de la población microbiana edáfica resultará controlada por el ritmo con que el material energético, entra en forma de materia orgánica. Las algas, cianobacterias y bacterias quimioautótrofas son los productores primarios de materia orgánica en los agrosistemas al fijar el carbono mediante la fotosíntesis son autótrofos (Cuadro 7).

¹⁰ Los exudados de organismos y sistemas radiculares actúan como máquinas de embalaje de las partículas del suelo, dando lugar a esos agregados que tan importantes son para que el suelo actúe como una esponja.

Dos grandes grupos de microorganismos edáficos influyen directamente en la dinámica de la materia orgánica y como consecuencia en la fisiología de la planta, en la dinámica de las comunidades que comparten redes tróficas y en su entorno edáfico inmediato (Wardle 2002):

- Un primer grupo de microorganismos, formado por organismos saprofiticos de vida libre que descomponen, mineralizan y alteran la materia orgánica que entra en el suelo. Fundamentalmente formado por bacterias, hongos y actinomicetes.
- Un segundo grupo de microorganismos que viven parcial o completamente asociados a las raíces –rizobiota-. Estos organismos consumen directamente parte de los compuestos carbonados producidos por las plantas y por ello, determinan en gran medida el crecimiento de éstas. Dentro de este grupo estarían mayoritariamente hongos micorrízicos y bacterias simbiotes.

Indirectamente, otros grupos de microorganismos influyen en la dinámica de la MO como las cianobacterias, que realizan la fijación biológica del nitrógeno y del carbono atmosférico, produciendo pequeñas cantidades de materia orgánica y contribuyen a la agregación actuando en la protección de la MO.

Cuadro 7. Clasificación de los organismos del suelo según tamaño

Microorganismos	microflora	< 5 µm	Bacterias Hongos
	microfauna	< 100 µm	Protozoarios Nemátodos
Macroorganismos	mesofauna	100 µm – 2 mm	Colémbolos Ácaros
	macrofauna	2 mm – 20 mm	Lombrices Termitas
Plantas	algas	10 µm	
	raíces	>10 µm	

.Adaptado de Swift *et al.* (1979)

El conocimiento de que los microorganismos actúan no sólo de vínculo de unión entre los procesos de producción primaria y secundaria, sino que propician la reintroducción de compuestos inorgánicos en el sistema y producen biomasa microbiana susceptible de servir como alimento a organismos detritívoros¹¹ introduce una nueva concepción, al proceso de descomposición que deja de tener un carácter terminal en la cadena trófica –como liberadores de nutrientes inorgánicos- para adquirir uno central en el control del sistema regulando

11 Los estudios en Ecología Microbiana en las últimas décadas han llevado a la idea del llamado “loop” microbiano que presupone que una gran cantidad de la producción primaria no es consumida directamente por herbívoros sino que es aprovechada por los microorganismos heterotróficos convirtiéndose en biomasa microbiana.

la dinámica de nutrientes y actuando de vía de redistribución de la energía (Álvarez 2000).

Si bien los microorganismos son un grupo clave en el aprovechamiento de la MOS que de esta forma, puede pasar a niveles tróficos superiores, una extensa fauna que abarca desde microbios a vertebrados tiene igualmente un papel importante en la descomposición y en la optimización de la actividad microbiana –fragmentación mecánica, predigestión, geofagia, transporte vertical de la MO, etc-. Principalmente la humedad y la materia orgánica son considerados los factores más importantes a la hora de considerar las variaciones poblacionales en la fauna del suelo

Las funciones que cumplen los invertebrados del suelo en relación a la dinámica de la MO dependen en gran medida de la eficacia de su sistema digestivo –consecuencia a su vez del tipo de interacción que realizan con los microorganismos del suelo- y de la naturaleza y la abundancia de las «estructuras biogénicas», que producen en el suelo.

Partiendo de estos dos criterios y en relación con la dinámica de la materia orgánica se pueden distinguir tres grandes grupos funcionales de invertebrados (Lavelle y Spain 2001):

- Los «microdepredadores». Incluye a los invertebrados más pequeños, los protozoos y los nemátodos. Estos organismos no producen ninguna estructura organo-mineral y su efecto principal es estimular la mineralización de la materia orgánica a través de la interacción predador-presa de protozoarios con bacterias y nemátodos con bacterias y hongos; el nitrógeno liberado en este proceso trófico –más eficientes los protozoos- está en forma de amonio NH_4^+ fácilmente disponible para las plantas y otros organismos edáficos.
- Los «transformadores de la hojarasca». En este grupo se encuentran los representantes de la mesofauna y de parte de la macrofauna. Además de reducir el tamaño de la MO aumentando la velocidad de descomposición; inoculan con organismos –que luego serán consumidos- la MO fragmentada, liberan nitrógeno que queda a disposición de las plantas y sus deyecciones favorecen la agregación y sirven de incubadora de los microorganismos.
- Los denominados como «ingenieros del ecosistema», pertenecientes a la macro y megafauna –principalmente lombrices, termitas y hormigas-, son aquellos invertebrados que producen estructuras biogénicas¹² –agregados, canales, deyeccio-

12 La acción funcional de estas estructuras biogénicas es muy importante, representando sitios con una actividad en los que ocurren procesos pedológicos importantes, como la estimulación de la actividad microbiana, la formación de la estructura agregacional del suelo, la dinámica de la MO a lo largo del perfil, o el intercambio de agua o gases en el suelo (Lavelle 2001).

nes- con las cuales modifican la disponibilidad y accesibilidad de un recurso para otros organismos.

Como ingenieros del ecosistema un gran número de autores también incluyen a las raíces de las plantas. Según Gonzalez Carcedo (2007) las plantas hacen dos cosas importantes en su ámbito radicular:

- Excretan a la rizosfera compuestos que proceden directamente del fotosintato y que estimulan la actividad microbológica: los rizodepósitos; formados por enormes cantidades de glicoproteínas, que tienen capacidad adherente -caso de las gломalinas-. Además estos componentes biológicos producen una cantidad importante de excretas metabólicas, muchas de las cuales tienen capacidad quelante (cetoácidos), compuestos orgánicos destinados a autoabastecerse de nutrientes inorgánicos (caso del ácido cítrico respecto del Fe unido al fosfato) o de enzimas, capaces de satisfacer a un ritmo variable las demandas nutricionales microbianas inorgánicas (caso del fosfato o del sulfato) y orgánicas (caso de monosacáridos y aminoácidos).
- Excretan al suelo sus mucílagos que permiten proteger la coifa o piloriza, evitando de esa manera el daño frente al esfuerzo mecánico de la planta, al ordenar (mediante fluidificación del medio) a las arcillas respecto al eje radicular y estabilizarlas de una manera permanente, en su entorno. Además en los casos en que la densidad de número de plantas es alta, los mucílagos radiculares que llegan hasta la superficie, adquieren una nueva función, la de retener el agua que se condensa por las noches (ocupando una función que muestran otros seres vivos tan lejanos como los líquenes) y generando una despensa de agua significativa para la planta.
- Además las plantas ceden al suelo su necromasa, lo que obliga a trabajar a una inmensa diversidad de pequeños animales con mandíbulas. Como consecuencia de su actividad se generan cantidades muy importantes de coprolitos, de elevada biodegradabilidad.

En la actualidad y en el contexto de la dinámica de la MO, los estudios sobre ecología microbiana dirigidos a descifrar las conexiones entre estructura, variabilidad y función de la biodiversidad edáfica, muestran que:

- La abundancia y diversidad de especies es relativamente menos relevante que las cualidades funcionales de los miembros de la comunidad del suelo.
- Los organismos viven en un medio tridimensional y en un mosaico espacial de condiciones físicas con variaciones en la composición y abundancia

de los recursos; esta heterogeneidad afecta a las comunidades y a su dinámica (Mc Cann 2000) y está muy influenciada por la distribución de las comunidades vegetales¹³ (Ettema y Warlde 2002).

- No existen grupos individuales trabajando en la transformación de la MO, sino una gran multiplicidad de organismos de variada plasticidad dietética, englobados en las denominadas «redes tróficas»
- La distribución de la vida del suelo -espacial y temporal está ligada a puntos específicos denominados «dominios funcionales» donde existe una mayor actividad biológica, asociados mayoritariamente con la humedad y con la disponibilidad de materia orgánica en cualquiera de sus formas (Barrios 2007).

Estos «dominios funcionales» (Cuadro 8) son lugares específicos del suelo influidos por un regulador principal que puede ser biótico -ejemplo una lombriz o una raíz¹⁴- o abiótico -por ejemplo la alternancia humectación/desección en el suelo-, en los cuales se regulan procesos del suelo tan importantes como la dinámica de la MO e indirectamente, se generan recursos para otros habitantes del medio edáfico.

Cuadro 8. Localización en el suelo de los principales dominios funcionales

rizosfera	Dominio que abarca la zona de influencia de la raíz y de sus exudados
hifosfera o micorrizosfera	Dominio que abarca la zona de influencia de los hongos mutualistas como las micorrizas
agregadosfera	Dominio formado por las estructuras biogénicas, los agregados del suelo y los intersticios entre macro y microagregados
la porosfera	Dominio formado por las láminas y los canales de agua entre los agregados
la drilosfera	Dominio que abarca la zona de influencia de la actividad de las lombrices de tierra
detritosfera	Dominio que abarca el área formada por restos orgánicos procedentes de plantas y animales aún reconocibles

Adaptado de Barrios (2007)

Por ejemplo, los efectos del dominio Drilosfera sobre la actividad microbiana y la descomposición de la MOS (Lavelle 2001) son enormemente variados: en el nivel del intestino, la actividad microbiana se estimula notablemente en cuestión de algunas horas gracias a un sistema mutualista

¹³ En ambiente semiáridos la herbivoría edáfica, es tan importante como la detritivoria o la omnivoría, en relación a las redes tróficas implicadas en la dinámica de la MO.

¹⁴ En estos lugares el regulador, si es biótico, crea unas condiciones favorables y una serie de estructuras como deyecciones, galerías y fisuras, que actúan como «islas de fertilidad» y que son ocupadas por invertebrados más pequeños y por microorganismos.

de digestión. En este proceso, el agua y el carbono soluble bajo la forma de moco intestinal producido por la lombriz activa la microflora aumentando la descomposición de las formas estables de MOS ingeridas. Las deyecciones y las paredes de las madrigueras, son ricas en nutrientes para la microflora del suelo haciendo que fuera del ámbito intestinal continúe una especie de "digestión externa", lo que produce un aumento, en un breve periodo de tiempo, de la mineralización y la biodisponibilidad de nutrientes para la planta. Cuando las deyecciones comienzan a secarse y a estabilizarse con la edad -días o semanas- la mineralización de la MO, la actividad microbiana y la disponibilidad de nutrientes disminuyen, a menudo alcanzando niveles más bajos que el suelo no digerido debido a la protección de esa MO. Finalmente en la escala de años y décadas en el perfil del suelo, parece que la drilosphere puede ejercer una regulación importante sobre la dinámica de la MO incorporada y sobre la velocidad de renovación y los almacenes de MO en el suelo

La demostración de la existencia de los «dominios funcionales» ha llevado consigo la identificación de «grupos funcionales» definidos como «el conjunto completo de especies que desempeñan cada una una función dada» (Blondel y Aronson 1995); éstos serían los responsables de procesos esenciales en el agrosistema, lo que ha dado lugar a nuevas clasificaciones que intentan englobar a los grupos funcionales dominantes en la biota del suelo¹⁵:

- microsimbiontes –como micorrizas o rizobium-
- descomponedores –como bacterias, actinomicetes y hongos-
- transformadores elementales –como los organismos nitrificantes-
- los ingenieros del ecosistema –como las lombrices, hormigas o termitas-
- los parásitos ligados a enfermedades –como nematodos fitopatógenos, hongos de la podredumbre radical-
- y los microreguladores –depredadores, parásitos, etc.-.

Actualmente está demostrado que la estabilidad de los agrosistemas está ligada de cerca a la abundancia, actividad e interacción de los diversos grupos funcionales que componen la red trófica del suelo (Wardle 2002), y que muchas de estas relaciones están mediadas por la interacción de las plantas.

De hecho, en los ecosistemas naturales, la regulación interna de estos grupos funcionales, es en gran parte

resultado de la biodiversidad vegetal que influencia la magnitud y el flujo de la distribución temporal de carbono; sin embargo, en los agrosistemas, la intensificación agrícola se aleja de esta forma de regulación, por lo que es de enorme importancia, que en el diseño agrosistémico se imite el funcionamiento de los ecosistemas a través prioritariamente de diseños complejos de diversidad vegetal cultivo y no cultivo, que posibiliten una mayor diversidad de hábitat y las fuentes de alimento –rotación, asociación, diversidad varietal, setos, islas florales, etc.

2.2.2. Los procesos de descomposición y alteración de la MO

Bajo la perspectiva de la vida en el suelo, la descomposición aparece como un bucle sucesional en el que la comunidad microbiana produce enzimas extracelulares que degradan y modifican el sustrato que en última instancia controla la composición de la comunidad microbiana. Todo este proceso se encuentra, a la vez, sujeto a la influencia de factores ambientales externos (Sinsabaugh y Foreman 2003) y antrópicos.

Los procesos de descomposición engloban:

- las fases iniciales de degradación endocelular –mediante lisosomas- y de fragmentación de los componentes orgánicos –estructurales, celulares, etc.-
- el catabolismo de los compuestos orgánicos.

Los organismos edáficos participan activamente en los procesos de descomposición de la necromasa –mayoritariamente vegetal- a nivel superficial y subterráneo; los macroorganismos a través de la fragmentación mecánica, la predigestión bioquímica y el enriquecimiento de las deyecciones en bacterias, esporas y mucopolisacáridos intestinales, con la mezcla con el medio mineral –geofauna- y con el transporte vertical de la MO, poniendo en conexión ambos sistemas el epígeno y el hipógeo.

El proceso está influido por la calidad de la necromasa, el ambiente físico-químico, la composición de la comunidad de descomponedores y el manejo del suelo.

Los microorganismos descomponedores transforman bioquímicamente la MO para asimilarla. La "rotura" de las moléculas puede hacerse de dos formas:

- por reacciones fotolíticas -que tienen una gran importancia en medio acuático, pero escasa en el medio edáfico-
- o por la actuación mayoritaria de enzimas degradativas, que facilitan la integración de los componentes orgánicos aportados al sistema suelo.

Las enzimas –endo o exoenzimas- se definen como «catalizadores solubles, de naturaleza orgánica y esta-

¹⁵ En la actualidad, uno de los grandes desafíos de la ecología microbiana, y especialmente en lo referido a la actividad heterotrófica y de procesamiento de carbono es el encontrar una relación entre estructura de la comunidad, la actividad metabólica y las capacidades funcionales (Waldrop *et al.* 2000).

do coloidal, elaboradas por las células vivas de bacterias, hongos, animales del suelo y del sistema radicular de vegetales superiores y en el momento de la muerte celular»

Además de sus numerosas ventajas para la vida, las enzimas, proporcionan a los microorganismos la energía que se libera al final de la reacción. Los enzimas excretados de forma activa están en función de las necesidades nutricionales o de sus sistemas defensivos. Los enzimas liberados tras la muerte celular cooperan puntualmente en determinados procesos edáficos.

En el contexto suelo, la mayor parte de las transformaciones de las moléculas orgánicas transcurre en el medio líquido; entrando en juego las enzimas exocelulares - en forma "libre" o asociadas a superficies minerales, orgánicas o membranosas-, éstas degradan los componentes orgánicos en el exterior de la célula enlazando el metabolismo microbiano con la composición del detrito (Fig. 1).

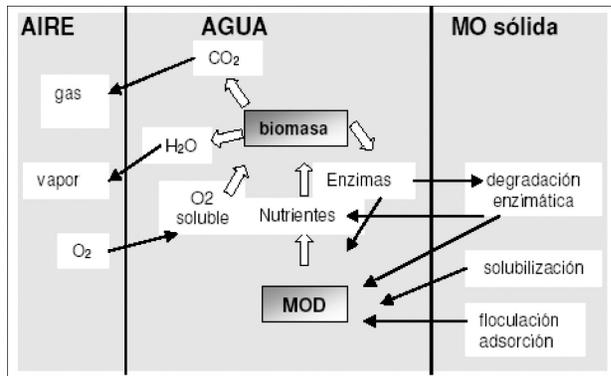


Figura 1. Esquema de las transformaciones enzimáticas de la MO en medio líquido. Adaptado de Haug (1993).

En el catabolismo, las moléculas orgánicas complejas son degradadas por procesos hidrolíticos bióticos –los procesos abióticos son minoritarios- en compuestos de bajo peso molecular; posteriormente, se produce una oxidación de estos compuestos orgánicos hasta obtener los compuestos inorgánicos simples que los constituyen (solubles, H₂S, NO₃⁻, PO₄³⁻, H₂O o gaseosas CO₂, NH₄⁺) que es lo que se conoce como mineralización. Algunos de estos compuestos, pueden ser «reorganizados», produciéndose una inmovilización temporal de nutrientes en la biomasa microbiana, pero reincorporándose más adelante –necromasa- a la dinámica de la materia orgánica. A la vez, en este proceso catabólico, parte de los materiales orgánicos degradados son incorporados como biomasa en los distintos organismos detritívoros.

En las siguientes etapas, generadoras de polímeros más estables, de nuevo será la actuación endo y exoenzimática de bacterias, actinomicetes y hongos –junto a factores abióticos aunque minoritarios- las responsables de la reorganización de los monómeros liberados no mineralizados, derivados de la descom-

posición, así como de la síntesis de compuestos similares a las sustancias húmicas –precursores prehúmicos- y de la reorganización para formar sustancias húmicas (Fig. 2)

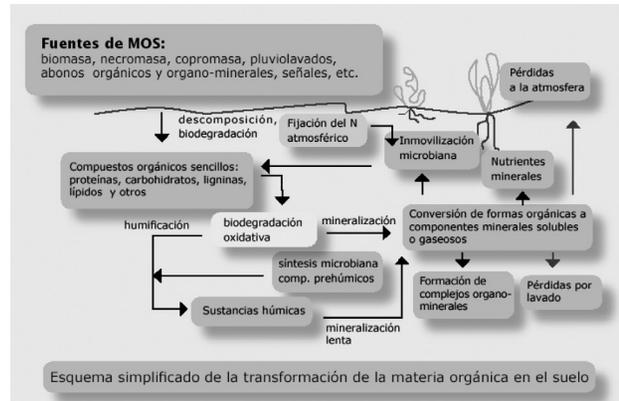


Figura 2. Esquema simplificado de la transformación de la materia orgánica.

La cinética de ésta transformación, depende de las necesidades nutricionales de la vida en el suelo y de diversos factores como:

- de la presencia permanente o no de vegetación, ya que el sistema radicular actúa como un dinamizador de la vida en el suelo
- de la composición bioquímica del sustrato –tipo de vegetación o tipo de aporte orgánico- fundamentalmente del contenido de carbono y nitrógeno, y de otros componentes que facilitan su degradación –polisacáridos, aminoácidos.- o que la retardan –ligninas, taninos-
- de la accesibilidad al sustrato –restos incorporados o dejados en superficie, picado del material vegetal, etc.-,
- de factores edáficos y ambientales –tipos de suelos, agregación, humedad, temperatura, aireación, vegetación – y del manejo agrario

La evidencia nos dice que el estado de la fracción orgánica en el suelo podría ser representado por un conjunto de compartimentos de carbono, biodegradándose a través de la biomasa microbiana a diferentes velocidades. Esto conduce a diferenciar grupos moleculares diferentes –pools-, asociados a una velocidad de biotransformación similar: así los ácidos húmicos se corresponderían con cinéticas lentas o pasivas; los fúlvicos con cinéticas medias y rápidas, mientras que las fracciones de compuestos orgánicos no humificados, serían los conjuntos moleculares al estilo clásico –proteínas, carbohidratos, polifenoles, etc.- que presentan una cinética rápida y que pueden participar en uno o varios pools (Gonzalez Carcedo 2007).

Los monómeros liberados, en el proceso de alteración de la MO pueden:

- Servir como soporte energético y fuente de nutrientes para los descomponedores –fundamentalmente azúcares y aminoácidos procedentes de la biodegradación de polisacáridos y péptidos-.
- Reaccionar bioquímicamente con otros componentes de la solución o de la matriz del suelo dando lugar a procesos edafogénicos como la formación de sustancias húmicas, quelatos o complejos organo-minerales
- Lixiviarse, en forma soluble o en forma coloidal.

De forma muy simple podríamos esquematizar el proceso de forma que los azúcares más complejos como la celulosa son atacados por hongos y bacterias, mientras que las proteínas son destruidas por las bacterias con liberación de nitrógeno inorgánico, que permite el crecimiento fúngico y hace posible la continuidad del proceso destructivo. En el caso de los azúcares y los aminoácidos su participación en la formación de las sustancias húmicas será como unidades estructurales o directamente como melanoidinas¹⁶; los monofenoles procedentes de la degradación de lignocelulosas tras la posterior polimerización de las unidades que no son biodegradadas, darán lugar a los núcleos aromáticos de las macromoléculas húmicas. La síntesis microbiana también origina las denominadas «huminas microbianas», y la degradación de la necromasa vegetal compuestos fenólicos pigmentados prehúmicos denominados como «melaninas vegetales» (fig. 3).

Los estados de evolución de las moléculas húmicas en el suelo conforman un *continuum* más o menos reversible controlado mediante la catálisis química y enzimática de los precursores húmicos presentes en la solución del suelo –dentro y fuera de los agregados- y por el estado de satisfacción de las necesidades nutricionales de los seres vivos que colonizan cada suelo –que a su vez depende de la diversidad de los aportes orgánicos, del manejo del suelo y de factores de formación como es el clima o la naturaleza de los minerales-, esto conduce a que exista una gran diversidad de estructuras moleculares en la fracción húmica.

En el laboratorio ¹⁷ y tras someter el suelo a diversos tratamientos, se estableció una diferenciación entre sustancias húmicas coloidales –ácidos húmicos y fúlvicos, solubles a pH alcalino- y las huminas –asociadas

irreversiblemente a la fracción mineral de forma tal que no pueden ser aisladas sin la aplicación de tratamientos químicos que modifiquen su estructura (Almendros 1994). Al tratar la fracción de ácidos húmicos mediante técnicas de fraccionamiento para aislar carbohidratos, se obtuvieron los ácidos crénicos / apocrénicos y los humatomelánicos.

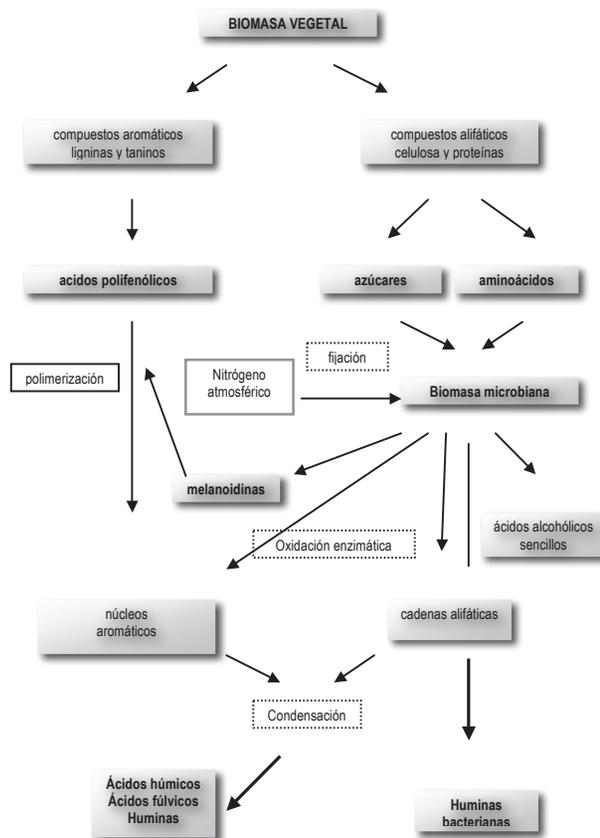


Figura 3. Esquema de la formación de sustancias húmicas por neoformación.

Aunque esta clasificación ha llegado hasta nuestros días (Cuadro 9), hoy sabemos que esta subdivisión es operacional, siendo frecuente para un mismo tipo de suelo, encontrar valores distintos de cada uno de ellos, si varían las técnicas analíticas.

Cuadro 9. Propiedades químicas de las sustancias húmicas

Propiedades	Ácidos Fúlvicos	Ácidos Húmicos	Huminas
Color	Amarillo a pardo	Pardo a negro	Negro
Peso molecular	Bajo	Medio	Alto
% de Carbono	40-50	55-60	>55
% de Nitrógeno	<4	3-4	>4
% de Oxígeno	44-48	33-36	32-34
Acidez total	10-14	6-10	5-6
Grupos funcionales:			
Grupos carboxílicos (COOH)	8-9	2-5	3-4
Grupos metoxílicos (OCH ₃)	<0.5	<0.5	<0.5
Grupos alcohólicos (OH)	3-6	<1-4	---
Grupos fenólicos (OH)	3-6	2-6	2
Grupos carbonil (C=O)	1-3	1-5	5-6

16 Las melanoidinas son monosacáridos unidos a aminoácidos cuyo origen puede ser microbiano, de exudados vegetales o de la degradación de la quitina; son productos de condensación nitrogenados, de color oscuro y muy reactivos, análogos estructuralmente a los ácidos húmicos-.

17 Los ácidos fúlvicos y ácidos húmicos presentan marcadas diferencias tanto en composición como en propiedades: Los ácidos húmicos se caracterizan por mayor polimerización, mayor contenido en C, N, grupos OH fenólicos, elevada capacidad de intercambio catiónico y mayor capacidad de unión con la arcilla. Los ácidos fúlvicos presentan mayor contenido en O, en grupos –COOH y –OCH₃, incremento de la acidez y mayor posibilidad de formar quelatos

En cuanto a su estructura espacial, diversos autores describen la unidad elemental de las macromoléculas húmicas, como un gran núcleo debido a la presencia de estructuras condensadas de naturaleza aromática dominante -polifenoles y quinonas-, asociado a un número mayor o menor de cadenas laterales que serían compuestos de naturaleza alifática. La visualización al microscopio electrónico, muestra un conjunto de partículas planas y redondeadas unidas entre sí, formando un retículo esponjoso (Almendros *et al.* 1982).



Este retículo de espacios abiertos y de enorme superficie externa puede atrapar o unir otros componentes orgánicos como carbohidratos, proteínas y lípidos o bien inorgánicos como arcillas, iones, oxihidróxidos y moléculas de agua. Al unirse con la fracción mineral se generan los agregados del suelo que les confieren sus especiales características de "esponja" que favorece el desarrollo de las comunidades vivas, edáficas y epigeas

Cuadro 10. Efectos edáficos de interés agrosistémico de la materia orgánica humificada

<p>Parámetros físicos</p>	<p>Color: Hacen a los suelos más oscuros, lo que facilita un incremento térmico en primavera y menores variaciones de temperatura.</p> <p>Estructura y porosidad: Participa como un gel más, en la agregación de las partículas minerales. Mejora y mantiene la estabilidad de la estructura agregacional aumentando la cohesión. Reduce la erosión y el encostramiento. Mejora la porosidad.</p> <p>Dinámica del agua: Aumenta la permeabilidad y la capacidad del suelo para retener el agua a baja presión de succión dado su comportamiento sol-gel que confiere una capacidad "esponja" a los suelos. Facilita la permeabilidad al optimizar la porosidad. Reduce las pérdidas por evaporación.</p>
----------------------------------	---

<p>Parámetros químicos</p>	<p>pH: Tiene poder tampón amortiguador, regulando el pH, impidiendo variaciones que serían perjudiciales para la nutrición vegetal y la vida en del suelo.</p> <p>Capacidad de cambio: regulan el intercambio y disponibilidad de nutrientes en la solución del suelo gracias a su CIC, muy superior a la de los minerales de la arcilla disminuyendo las pérdidas por lixiviación</p> <p>Nutrientes: Provee de nutrientes en forma orgánica y mineral. Favorece la solubilidad de los minerales. Origina compuestos más estables y mediante su capacidad quelante da lugar a en la construcción de las entidades organizadas del suelo (complejos organo-metálicos, complejos argilo-húmicos).. Mantiene las reservas orgánicas de nitrógeno en el suelo.</p> <p>Detoxificación: gran capacidad para absorber y retener sustancias xenobióticas.</p>
<p>Parámetros biológicos</p>	<p>Sobre la rizosfera: Equilibra la porosidad del suelo, por lo que favorece el intercambio de gases en la zona radicular; regula el estado oxido-reductor del medio. Favorece la simbiosis de micorrizas y rizobium.</p> <p>Sobre los organismos: Aumenta la biodiversidad al aumentar el número de hábitat, la cantidad de nutrientes y de energía y el número de presas. Regula la actividad de los organismos, favoreciendo la biotransformación de las sustancias orgánicas y la formación posterior de nuevas sustancias húmicas.</p> <p>Sobre la planta: Favorece la germinación de las semillas y la nascencia de la raíz primaria, gracias al amento de la T^a, la mayor agregación y la disponibilidad iónica. Activa la formación de tricoblastos en las plantas por sus ligeros efectos hormonales. genera un incremento de la permeabilidad y captura de O₂, estimula a determinados genes, lo que condiciona un mayor crecimiento longitudinal Mejora la resistencia de la planta frente a enfermedades y plagas y equilibra y mejora su estado nutritivo. Contrarresta el efecto de tóxicas y biocidas.</p>

En el contexto agrosistémico, el humus es una fuente de nutrientes en formas de liberación retardada y una reserva de coloides orgánicos, sin olvidar su interacción sobre las raíces y las respuestas que se generan en las planta; además es un compartimento regulador de los procesos físicos, químicos y biológicos que se dan en el suelo (cuadro 10), participando activamente en los procesos de detoxificación ambiental a través del bloqueo de productos tóxicos que de otra forma se incorporarían a la cadena trófica (Almendros 1994). Considerándose realmente su papel como sumidero estable de carbono para la mitigación del cambio climático.

Y al igual que para su transformación, la MO debe estar integrada en esa «red de redes», sus servicios en el

suelo no se muestran independientemente, sino como resultado de la interacción de la MO en todas sus formas dentro de una matriz –el suelo-, teniendo un papel integrador de los factores agroambientales y de manejo.

2.3. La redistribución física y la estabilización del carbono en el suelo

La biotransformación molecular de la MO experimenta una secuencia constante en sincronía con la matriz mineral del suelo y en respuesta a perturbaciones del agroecosistema que pueden afectar ampliamente a ésta dinámica¹⁸

Virtualmente toda la MO del suelo es un sustrato más o menos consumible para los microorganismos; donde no hay mecanismos de protección -por ejemplo en las capas bien aireadas de la turba o en el lecho del bosque, la estabilidad biológica será controlado enteramente por la mayor o menor degradabilidad ofrecida por la estructura química de la MO-. Sin embargo, en el interior del suelo puede acumularse la MO en respuesta a la presencia y a la naturaleza de los mecanismos de protección ofrecidos por la matriz mineral del suelo. Esta protección altera la velocidad de descomposición de la MO y modifica su composición química y su estado.

Los mecanismos de protección de la materia orgánica abarcan escalas de tamaño que se extienden de micrómetros a centímetros y se pueden atribuir a tres características generales de la matriz mineral del suelo (Baldock y Skjemstad 2000) (Cuadro 11).

Cuadro 11. Características de la matriz mineral del suelo que influyen en los mecanismos de protección de la materia orgánica

- la naturaleza química de la fracción mineral del suelo y la presencia de cationes polivalentes
- la naturaleza física de la fracción mineral, especialmente la presencia de superficies capaces de fijar los materiales orgánicos por adsorción
- la arquitectura de la matriz del suelo en relación a las características del espacio poroso y la agregación

Adaptado de Baldock y Skjemstad (2000).

La mineralogía de las partículas del suelo, en particular de la fracción arcilla, ejerce un control sobre la protección de la MO a través del tipo y la densidad de sitios activos capaces de adsorber materiales orgánicos y del grado en el cual, las arcillas se mantienen en un estado floculado estable. La presencia de las partículas de arcilla en el suelo proporciona el área superficial más significativa sobre la cual la MO puede ser fijado por adsorción (Baldock y Skjemstad 2000)

18 . Sin embargo mientras que la estabilización física puede limitar temporalmente la accesibilidad de ciertos compuestos de carbono a los descomponedores, las alteraciones, tales como el enriquecimiento en nitrógeno tras un abonado mineral, la prolongación de períodos de encharcamiento por exceso de riego o un mal drenaje por un excesivo laboreo, pueden afectar directa e irreversiblemente a la biología de la descomposición.

La presencia de CaCO₃ ó Al y Fe amorfo conducen a acumulaciones de C orgánico. La presencia de cationes polivalentes puede también afectar indirectamente la estabilidad biológica de la MO ya que las partículas de arcilla saturadas con los cationes polivalentes tienden a permanecer en un estado floculado que reduce la exposición de la MO fijada por adsorción en la superficies de la partícula de la arcilla o que existe encapsulada en los paquetes de arcillas entre agregados (Baldock y Skjemstad 2000)

En cuanto a la arquitectura de la matriz del suelo, conviene recordar que la dinámica de transformación y alteración de la MO ocurre dentro del espacio poroso¹⁹. Por lo tanto el estado del espacio poroso y su composición va a influir, en la estabilidad biológica de los materiales orgánicos (Cuadro 12) y el estado y la estabilidad de la MO en la arquitectura de la matriz del suelo, a través fundamentalmente de la agregación.

Cuadro 12 . Influencia del espacio poroso sobre la dinámica de la materia orgánica en el suelo

- El espacio poroso regula el equilibrio aire/agua a través del cuál los procesos de descomposición y mineralización de la MO se optimizarán o se detendrán
- Los cambios en la distribución de tamaño del poro hacia una mayor proporción de poros grandes, se acompañan por índices más altos de mineralización
- La distribución de tamaño del poro influye la capacidad de los organismos descomponedores para alcanzar los sustratos orgánicos potencialmente mineralizables
- Con el aumento de contenido de arcilla, se incrementan tamaños de poro más pequeños y la estabilización potencial de MO contra el ataque biológico es debida al aumento de la exclusión de los organismos descomponedores
- Para tamaños de poro menores que el límite al que pueden entrar los microorganismos, la descomposición de la MO ocurre por difusión de enzimas extracelulares y por difusión de los productos de las reacciones enzimáticas de nuevo a los organismos.
- El concepto de la exclusión, basado en el tamaño físico de los organismos descomponedores, se puede ampliar a la protección de la depredación de microorganismos por la fauna del suelo. Por ejemplo protozoos y nematodos están excluidos de poros menores de 5 µm y 30 µm respectivamente.
- La encapsulación de la MO por la floculación de las partículas de arcilla puede ocurrir en las escalas del tamaño que se extienden de los nanómetros -en poros entre los paquetes de las partículas de la arcilla- a los centímetros y supone una barrera física entre los sustratos y los organismos descomponedores.

19 El espacio poroso del suelo se compone de una serie continua de poros que se extienden desde el <0.1 µm de diámetro de los microporos hasta >20 µm de los macroporos con un límite superior en tamaño del orden de centímetros.

- La MO que se encuentra en el interior de los agregados tiene componentes de carbono químicamente diferentes y más estables –más carbono aromático y una menor abundancia de grupos O-alkyl- a la que se encuentra entre los agregados.
- La presencia microporos internos llenos de agua en relación a los poros más grandes entre agregados pueden originar zonas anaeróbicas bajo condiciones bien aireadas, la presencia de núcleo orgánicos intraagregados aumenta la demanda biológica de oxígeno en el interior del agregado.
- No toda la MO en el suelo está situada uniformemente dentro del espacio poroso -la encontramos como partículas discretas, como masas de materiales amorfos mucilaginosos exudadas por los microorganismos, como componentes disueltos, o como moléculas individuales fijadas por adsorción a las partículas minerales del suelo- ni toda la MO está en contacto directo o asociada a las superficies minerales

La agregación, es la causa y a la vez, el efecto más manifiesto de la protección de la MO en el suelo y es una de las consecuencia de un proceso edafogenético denominado estructuración, definido como «el proceso edafológico que implica la generación de estructuras específicas llamadas estructuras agregacionales o agregados a través de la unión de diversos edafo-constituyentes en un ámbito determinado del suelo» (Cuadro 13).

Cuadro 13. Características del proceso de estructuración

Textural	Agregacional
Intervienen sólo los componentes texturales. Tipos de estructura: laminar, prismática, angular, subangular y columnar	Interacción de los componentes texturales inorgánicos y los componentes orgánicos. Al producto se le llama agregado. Tipos de estructura: migajosa y granular
Componentes cementantes son: · el agua y los iones (cationes) o las sales que contenga el agua (soluto) y depende de la interacción de la superficie específica mineral y de la carga eléctrica.	Los componentes cementantes son: · adherentes inorgánicos -iones en solución, geles de oxihidróxidos y algunas sales-. · adherentes orgánicos: procedentes de la necromasa, de la neomasa, compuestos excreción bacterianos, fúngicos, radiculares y contenidos intestinales de la fauna del suelo
La estabilidad de agregado textural dependerá: · de la superficie específica y carga eléctrica de los componentes texturales y de la concentración, carga y densidad de carga eléctrica del catión dominante en la solución del suelo	La estabilidad del agregado estructural, depende: · de la superficie específica de los componentes argílicos; de la resistencia metabólica a la degradación enzimática de las moléculas orgánicas adheridas y de todos los factores que condicionan la actividad catalítica o del grado de hidratación de la MO que condiciona su envejecimiento.
Muestra tendencia a formar geometrías angulares, a una mayor densidad y a generar grietas por las que circula el agua.	Muestra tendencia a adoptar formas esféricas de mayor volumen y menor densidad, a retener agua y nutrientes y permitir una gran cantidad de microhábitat para el medio vivo.

Las estructuras agregacionales²⁰ están basadas fundamentalmente en la capacidad del componente adherente y es a través de la formación de las mismas, que se generan las condiciones favorables para el desarrollo de la vida en el suelo.

Los agregados no sólo protegen físicamente la materia orgánica de suelo, si no también influyen en la estructura microbiana de la comunidad, limitan la difusión del oxígeno, regulan el flujo del agua, determinan la adsorción y la desorción de nutrientes, y reducen las pérdidas por erosión. Todos estos procesos tienen efectos profundos en la dinámica agrosistémica.

La agregación del suelo es una característica transitoria y los agregados se están formando y destruyendo continuamente. Recordemos que los agregados del suelo son los que inducen a que el medio edáfico se comporta como una «esponja» en la que la conjunto materia-hidrosfera-atmósfera es empaquetado de forma tan eficiente que en un escaso volumen se genera una enorme área superficial. Por esta razón, el suelo bien provisto de MO, con una agregación estable y un manejo adecuado, absorbe agua, posee una inmensa “capacidad catalítica” y alberga enormes cantidades de organismos edáficos. Todas estas propiedades no son propias de las rocas, y han permitido el desarrollo de una biosfera terrestre emergida, inconcebible sin tales atributos (Gonzalez Caicedo 2007)

La protección de la MO contra el ataque biológico dentro de un agregado será más grande cuanto más alta sea la estabilidad de los agregados y más baja la dinámica de formación-destrucción. La protección no es un retiro permanente y completo del carbono orgánico frente a la descomposición, pero si la reduce en relación a los materiales no protegidos²¹.

A través de la protección por la matriz del suelo, se estabiliza la MO impidiendo la biotransformación y alteración o retardando la misma en una escala de tiempo y espacio específica para cada suelo. (Cuadro 14):

20 Los organismos edáficos y las plantas son también generadores de estructuras agregacionales de enorme importancia en el suelo: coprolitos -formados en el intestino de los pequeños animales-, agregaciones rizosféricas -formas derivadas de la acción adherente de mucopolisacáridos vegetales radiculares-, agregaciones fúngicas -formas generadas por hongos y costras de líquenes-, agregaciones bacterianas -formas generadas por colonias bacterianas y por la morfología de los actinomicetos- son sólo algunos ejemplos (Gonzalez Caicedo 2007)

21 Una excepción a esta generalización puede ser la captación potencial de MO dentro de los espacios de la capa intermedias de los silicatos de los minerales de la arcilla (Theng *et al.* 1986).

Cuadro 14 . Mecanismos de estabilización de la materia orgánica en el suelo

- Estabilización físico-química: a través de la unión de partículas minerales elementales del tamaño de limos y arcillas con materiales orgánicos, quedando estos últimos protegidos en forma de compuestos órganominerales
- Estabilización bioquímica: hace referencia a la estabilización de la materia orgánica debida a la heterogeneidad de su composición química y a través de la formación de compuestos lentamente biodegradables como las sustancias húmicas
- Estabilización física: mayoritariamente corresponde a la protección de la materia orgánica a través de los agregados del suelo

Adaptado de Six et al. (2002)

Es importante que recordemos que el grado de estabilización depende de las características químicas y físicas de la matriz mineral, del arreglo tridimensional de partículas –agregación–, del espacio poroso en el volumen del suelo y de la morfología y composición química de la materia orgánica.

En este sentido cada matriz mineral tendrá una capacidad única y finita de estabilizar la materia orgánica y cada fracción de la MO tendrá una estabilidad biológica específica, es decir una determinada resistencia al ataque enzimático. Esta estabilización es muy importante ya que de ella dependen, además de la efectividad en el denominado secuestro del carbono, las propiedades de la materia orgánica en los suelos de cultivo.

3. A modo de reflexión final

La conceptualización de la MO en el suelo ha evolucionado enormemente en los últimos años debido, no sólo a los avances científicos realizados en las últimas décadas sobre la caracterización estructural y molecular de la MOS y sus componentes, sino también a la investigación agrosistémica realizada desde los distintos enfoques que confluyen en el análisis de la actividad agraria, fundamentalmente el enfoque sistémico (Gómez Sal 2001) y a un pensamiento científico y técnico más crítico sobre los impactos visibles y no visibles del modelo de gestión agraria industrial.

Al mismo tiempo, la recuperación de la rica herencia realizada en la investigación sobre «Ecología del suelo», así como el surgimiento de nuevos métodos para la caracterización del suelo, sus comunidades y sus componentes a través de la biología molecular, demuestran como la estabilidad de los agrosistemas está ligada a la abundancia, actividad e interacción de los diversos grupos funcionales que componen la red trófica del suelo y que la mayoría de estas relaciones están mediadas por la interacción de las plantas que influyen la magnitud, el flujo de la distribución temporal de carbono y que funcionan como un integrador de los componentes del sistema arriba y abajo del suelo, los cuales a pesar de estar espacialmente separados están conectados a nivel biológico por las plantas.

He querido mostrar a lo largo del texto, que aunque conocemos la complejidad química de la composición y la biodegradación de los restos orgánicos y la gama de procesos que controlan la dinámica y estabilización de la materia orgánica del suelo –química del carbono, interacción con los sistemas enzimáticos, interacción con la fracción mineral, con el clima o con las alteraciones antrópicas–; aunque sepamos determinar la biodiversidad edáfica conocida a nivel molecular; la evidencia nos dice que desconocemos más de lo que conocemos y que la cuantificación de la capacidad protectora de un suelo a nivel científico y experimental es muy compleja y que las perturbaciones a las que es sometido el agrosistema afectan a esta dinámica, llegando a hacer irreversibles componentes del proceso que ni siquiera se habían considerado.

Por lo tanto quiero hacer hincapié en que sólo un manejo agrario basado en un marco conceptual agroecológico puede permitir encontrar los principios unificadores que abarquen todos y cada uno de los múltiples parámetros, que hacen funcionar al suelo de cultivo como tal. Teniendo en cuenta que no podemos hablar de subsistemas separados –suelo, agua, vegetación, atmósfera–, sino de componentes conectados en un mismo sistema, de niveles de organización y de propiedades emergentes y abordar su estudio y gestión de forma multidisciplinar.

Para la agroecología la integridad del agrosistema depende de las sinergias entre un modelo concreto de uso de los recursos, la diversidad de plantas cultivo y no cultivo y el funcionamiento continuo de una comunidad macro y microbiana dentro y fuera del suelo (Gliessman 2001), estando estas últimas, como no podía ser de otra manera sustentadas por un suelo rico en materia orgánica en todas sus formas.

La consideración de la MO dentro de éste ámbito nos muestra como la reposición de la materia orgánica en el suelo, la eficiencia en su dinámica y la expresión de los servicios agrosistémicos que provee, forman parte de un contexto agrosistémico más amplio, integrado en un ambiente particular que impone restricciones biológicas al sistema de cultivo, en un espacio socioeconómico específico en que los productores toman sus decisiones y dentro de un diseño en el que el objetivo principal a la hora de manejar el agrosistema es integrar los factores ecológicos y de manejo. Las circunstancias naturales, los factores socioeconómicos, hacen relación al ambiente externo

En este medio la dinámica de la materia orgánica en un proceso natural e integrador que orquesta y permita la expresión de la vida, en todas sus formas.

En el contexto agrosistémico, el humus es una fuente de nutrientes en formas de liberación retardada y una reserva de coloides orgánicos, sin olvidar su interacción sobre las raíces y las respuestas que se generan en las planta; además es un compartimento regulador de los procesos físicos, químicos y biológicos que se dan en el suelo (cuadro 9), participando activamente en los procesos de detoxificación ambiental a través del bloqueo de productos tóxicos que de otra forma se incorporarían a la cadena trófica (Almendros

1994). Considerándose realmente su papel como sumidero estable de carbono para la mitigación del cambio climático.

Y al igual que para su transformación, la MO debe estar integrada en esa «red de redes», sus servicios en el suelo no se muestran independientemente, sino como resultado de la interacción de la MO en todas sus formas dentro de una matriz –el suelo–, teniendo un papel integrador de los factores agroambientales y de manejo.

Referencias

- Almendros G.; Polo, A.; Dorado, E. 1982. Fraccionamiento y caracterización de la materia orgánica de la turbera de Mazagón. *Annales INIA. Ser. Agric.* 18: 29-42
- Almendros, G. 1994. Effects of different chemical modifications on peat humic acid and their bearing on some agrobiological characteristics of soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 25:2711-2736.
- Altieri MA, Nicholls CI. 2003. Soil fertility management and insect pests: harmonizing soil and plant health in agroecosystems. *Soil and Tillage Research* 72: 203
- Alvarez, S. 2003. La descomposición de la materia orgánica en humedales: importancia del componente microbiano. *Ecosistemas* 24 (2):17-29
- Astier, M., O. Masera y Y. Galván-Miyoshi 2008. Evaluación de la sustentabilidad: un enfoque dinámico y multidimensional. Ed. SEAE, CIGA, CIECO, ECOSUR, GIRA, FIAES, MundiPrensa.
- Baldock J.A.; Nelson, P.N., 1999. Soil organic matter. In: Sumner, M., Editor, *Handbook of Soil Science*, CRC Press, Boca Raton, FL
- Baldock, J.A.; Skjemstad, J.O., 2000. Role of the soil matrix and minerals in protecting natural organic materials against biological attack. *Organic Geochemistry* 31, 697– 710.
- Barrés, M.T., Bello, A., Jordá, C. Tello, J.C. 2007. La eliminación del bromuro de metilo en protección de cultivos como modelo mundial para la conservación del medio ambiente. MAPA
- Barrios, E. 2007. Soil biota, ecosystem services and land productivity. *Ecological Economics* 64 (2):269-285
- Bello, A., López Pérez, J.A., Díez Rojo, M.A., López Cepero, J., García Álvarez, A. 2008. Principios Ecológicos en la gestión de los agrosistemas. *Arbor.* 729:19-29
- Blondel, J.; Aronson, J. 1995. Biodiversity and ecosystem function in the Mediterranean Basin: human and non-human determinants. En: Davis, G.W.; Richardson, D.M. (ed.). *Mediterranean-Type Ecosystems. The function of biodiversity.* Ecological Studies, vol. 109. Springer-Verlag, Berlín.
- Boulaine, J. 1989. *Histoire des Pédologues et de la Science des Sols (History of Pedologists and Soil Science)*, INRA Editions, Paris.
- Bowen, G.D., Rovira A.D. 1999. The rhizosphere and its management to improve plant growth. *Advances in Agronomy* 66:1–102
- Canolo, L., Valladares, G. 2011. Fragmentación del hábitat y desensamble de redes tróficas. *Ecosistemas* 20:68-78.
- Coleman, D.C.; Hendrix, P.F.; Odum, E.P. 1998. Ecosystem health: an overview. In: Wang, P.H. (Ed.), *Soil Chemistry and Ecosystem Health.* Soil Science Society of America Special Publication N° 52, Madison, WI, pp.1–20
- De la Peña, E. 2009. Efectos de la biota edáfica en las interacciones planta-insecto a nivel foliar. *Ecosistemas* 18(2):64-78.
- Ellies, A. 2004. Efecto de la materia orgánica sobre la estructura del suelo. Simposio Residuos orgánicos y su uso en sistemas agroforestales. Temuco, Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo y Universidad de la Frontera.
- Elliott, E.T.; Cambardella, C.A. 1991. Physical separation of soil organic matter. *Agric. Ecosystems Environ.* 34:407-419.
- Ettema, C.H., Wardle, D.A. 2002. Spatial soil ecology. *Trends in Ecology & Evolution* 17:177-183.
- Evanylo, G.; Sherony, C.; Spargo, J.; Stamer, D.; Brosius, M.; Haering, K. 2008. Soil and water environmental effects of fertilizer-, manure-, and compost- based fertility practices in an organic vegetable cropping system. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 127 (1–2): 50-58
- Feller, C.; Boulaine, J. The reappearance of the word humus in the 17th century and its agricultural meaning *Revue For. Française* 29:487–495.
- FIBL, 2007. *Organic Farming and Climate Change.* Monograph. Research Institute of Organic Agriculture. International Trade Centre UNCTAD/WTO.
- Franzlubbers, A.J., 2001. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. *Soil Till. Res.*, 66:95-106.
- Galantini, J. A., 2002. Contenido y calidad de las fracciones orgánicas del suelo bajo rotaciones con trigo en la región semiárida pampeana. *INTA, Argentina. RIA*, 30:125–146.
- Galloway, J.N., Townsend, A.R., Erisman, J.W., Bekunda, M., Cai, Z., Freney, J.R., Martinelli, L.A., Seitzinger, S.P., Sutton, M.A. 2008. Transformation of the Nitrogen Cycle: Recent Trends, Questions, and Potential Solutions, *Science* 320:889-892
- Gliessman, S. R. 2002. *Agroecosystem sustainability : developing practical strategies.* Advances in agroecology. Boca Raton, Fla. : CRC Press.
- Gómez Sal, A. 2001. Aspectos ecológicos de los sistemas agrícolas. Las dimensiones del desarrollo. Labrador y Altieri (eds.) *Agroecología y Desarrollo.* Mundi Prensa.
- Gonzalez Carcedo, S. (2007), *Curso avanzado de bioquímica de suelos.* www.madrimasd.org/blogs/universo/2006/09/05/39810
- Guerrero, R.; Berlanga, M. 2003. El planeta simbiótico: contribución de los microorganismos al equilibrio de los ecosistemas. *Actualidad SEM* 36:16-22
- Haug, R.T. 1993. *The Practical Handbook of Compost Engineering*, Lewis Publishers,
- Hayes, M.H.B.; Clapp, C.E., 2001. Humic substances: considerations of compositions, aspects of structure, and environmental influences. *Soil Science*, 166:723-737.

- Hole, D.G., Perkins, A.J., Wilson, J.D., Alexander, H.I., Grice, P.V., Evans, A.D. 2005. Does organic farming benefit biodiversity? *Biological conservation* 122:113-130.
- Jastrow JD, Amonette JE, Bailey VL. Mechanisms controlling soil carbon turnover and their potential application for enhancing carbon sequestration. *Climatic Change* 80(1):5-23.
- Kalbitz, K., Schwesig, D., Schmerwitz, J., Kaiser, K., Haumaier, L. 2003. Changes in properties of soil-derived dissolved organic matter induced by biodegradation. *Soil Biology & Biochemistry* 35:1129-1142
- Kluyver, A.J. 1956. *The Microbes Contribution to Biology*. Harvard University Press.
- Labrador J. 2001. - La materia orgánica en los agrosistemas. Ed. MAPA/Mundi-Prensa. Madrid.
- Labrador, J.; Sicilia, A.; Torrejón, A. 2009. Agroecología, fertilidad y mediterraneidad. *Agroecología* 4:97-110
- Lal, R. 2007. - Farming carbon. *Soil & Tillage Research* 96:1-5
- Latour, B. 1988. *Science in Action: How to Follow Scientists and Engineers through Society*, Harvard University Press, Cambridge, USA
- Lavelle, P., Decaens, T., Aubert, M., Barot, S., Blouin, M., Bureau, F., Margerie, F., Mora, P., Rossi, J.P. 2006. Soil invertebrates and ecosystem services. *European Journal of Soil Biology* 42(1):3-15.
- Lavelle, P., Spain, A.V. 2001. *Soil ecology*. Kluwer Academic Publishers, London. UK.
- León Sicar, T.E. 2009. Agroecología : desafíos de una ciencia ambiental en construcción. *Agroecología* 4:7-17
- Liebig, J. 1840. *Die organische Chemie in ihrer Anwendung auf Agrikultur und Physiologie (Chemie Organique appliquée à la Physiologie Végétale et à l'Agriculture)*. Vieweg, Braunschweig
- Manlay, R. M., Feller, C., Swift, M.J. 2007. Historical evolution of soil organic matter concepts and their relationships with the fertility and sustainability of cropping systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 119 (3-4):217-233
- Marschner, B.; Kalbitz, K. 2003. Controls of bioavailability and biodegradability of dissolved organic matter in soils, *Geoderma* 113:211-235.
- Martínez, E.; Fuentes, J.P.; Acevedo, E. 2008. Soil organic carbon and soil properties. *J. Soil Sc. Plant Nutr.* 8(1):68-96
- Moorhead, D.; Sinsabaugh, R.; Linkins, A.; Reynolds, J. 1996. Decomposition processes: modelling approaches and applications. *The Science of the Total Environment* 183:137-149.
- Morgan, R.P.C. 1997. - *Erosión y conservación del suelo*. Ed. Mundi-Prensa. Madrid
- Nicholls, C.I. 2010. Contribuciones agroecológicas para renovar las fundaciones del manejo de plagas. *Agroecología* 5:7-22
- Primavesi, A. 1980. - *Manejo ecológico del suelo*. Ed. Ateneo, Mexico
- Reicosky, D.C., 2002. Long - Term Effect of Moldboard Plowing on Tillage - Induced CO₂ Loss, in J. M. Kimble, R. Lai and R. F. Follet: *Agricultural Practices and Policies for Carbon Sequestration in Soil*. 87-96. Lewis Publishers.
- Rusch, H.P., 1972. *La fécondité du sol (original title: "Bodenfruchtbarkeit", 1968, K.F. Haug Verlag; translated from German to French by C. Aubert)*. Le Courier du Livre, Paris.
- Schnitzer, M. 1991. - Soil organic matter -The next 75 years-. *Soil Science* 151 (1).
- Sinsabaugh, R.; Foreman, C. 2003. Integrating DOM metabolism and microbial diversity. In S. Findlay, & R.L. Sinsabaugh (eds.), *Aquatic Ecosystems: The Interactivity of Dissolved Organic Matter*. Academic Press. San Diego.
- Six, J.; Conant, R.T.; Paul, E.A.; Paustian, K. 2002. Stabilization mechanism of soil organic matter : implications for C-saturation of soil. *Plant and Soil*, 241:155-176
- Swift, M.J.; Heal, O.W.; Anderson, J.M., 2001. *Decomposition in terrestrial ecosystems*. Blackwell Scientific Publications, Oxford. UK.
- Thaër, 1809. *Principes raisonnés d'agriculture (Principles of rational agriculture)* Translated from German by E.V.B. Crud (1811-1816), J.J. Prechoud Ed, Paris
- Theng, B.K.G.; Churchman, G.J.; Newman, R.H., 1986. The occurrence of interlayer clay-organic complexes in two New Zealand soils. *Soil Science* 142:262-266.
- Tiessen, H.; Cuevas, E.; Chacon, P. 1994. - The role of soil organic matter in sustaining soil fertility, *Nature* 371:783-785.
- Urbano Terrón, P. 1988. *Tratado de Fitotecnia general*. Ed. Mundi-Prensa
- Vallejo, V.R., Díaz Fierros, F., y De la Rosa, D. 2005. Impactos sobre recursos edáficos. Evaluación de los Impactos del Cambio Climático en España (ECCE). Proyecto financiado por la Oficina Española de Cambio Climático (MIMAM).
- Waksman, S.A. 1938. *Humus: origin, chemical composition, and importance in nature*. The Williams & Wilkins company.
- Waldrop, M.; Balser, T.; Firestone, M. 2000. Linking microbial community composition to function in a tropical soil. *Soil Biology and Biochemistry* 32: 1837-1846.
- Wardle, D. A.; Lavelle, P. 1997. Linkages between soil biota, plant litter quality and decomposition. In G. Cadisch and K. E. Giller, eds. *Driven by nature: plant litter quality and decomposition*. 107-124. CAB International, London
- Wardle, D.A 2002. *Communities and Ecosystems: Linking the aboveground and belowground components* Monographs in population biology, 31, Princeton University Press. New Jersey
- Zsolnay, A. 2002. Dissolved organic matter: artefacts, definitions and functions. *Geoderma* 113:187- 209