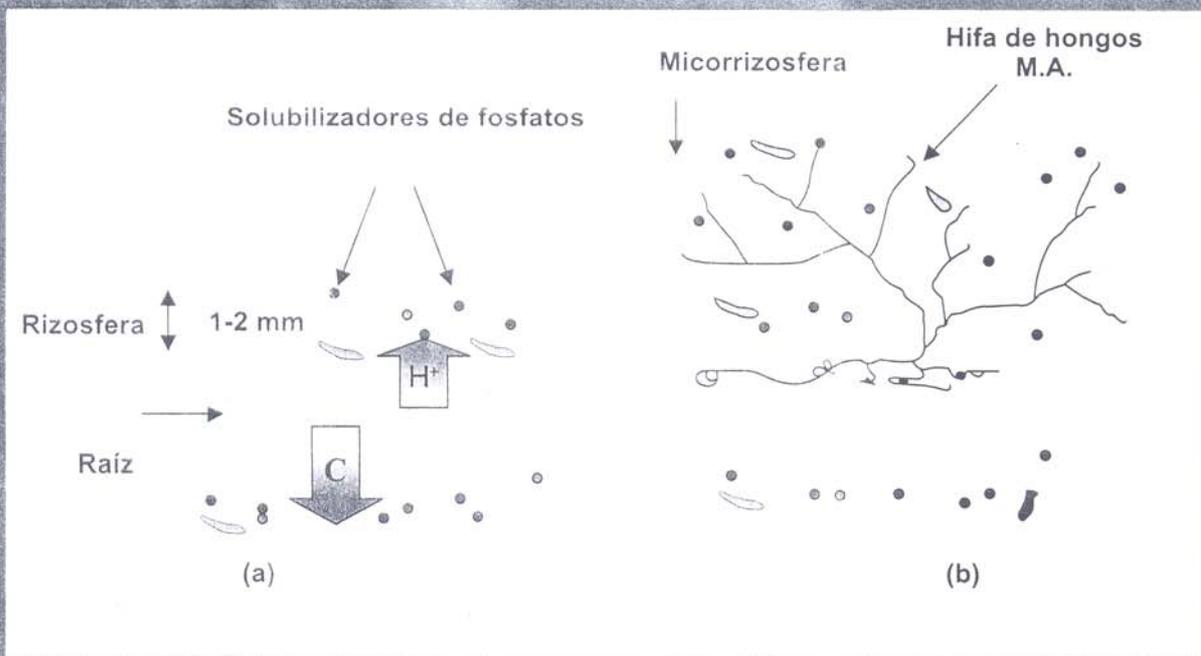


USO DE MICROORGANISMOS EN LA AGRICULTURA

MATERIA ORGÁNICA: MITO O REALIDAD?



CONFERENCIAS MAGISTRALES Y BIMPOSIOS

X CONGRESO DE LA SOCIEDAD COLOMBIANA DE LA CIENCIA DEL SUELO

Medellín, 2001

X CONGRESO DE LA SOCIEDAD COLOMBIANA DE LA CIENCIA DEL SUELO

MEMORIAS



EL SUELO: UN COMPONENTE DEL MEDIO NATURAL

Medellín, Octubre 11 al 13 de 2000

Editores:

Juan C. Pérez
Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín

Claudia L. Álvarez
Ingeniera Agrónoma. Asistente Técnico Particular

Nelson Walter Osorio
Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín

2001

MINERALIZACIÓN Y HUMIFICACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO: CONSECUENCIAS SOBRE LA CONTAMINACIÓN

Juan F. Gallardo Lancho

Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Apartado 257, Salamanca 37071 (España).
E-mail: jgallard@usal.es y jgallard@fresno.csic.es

Resumen

La dinámica orgánica edáfica está regida por factores ambientales, los cuales determinan el doble proceso de mineralización y humificación orgánica. Si el primer proceso favorece la liberación de CO_2 , el segundo permite la acumulación de C orgánico (y bioelementos asociados, en ambos casos). Este doble juego posee consecuencias trascendentales sobre la contaminación, entendida ésta de una manera general. Así, en el caso del aumento del CO_2 atmosférico, un incremento de la mineralización supone un agravamiento del problema, mientras que una mayor humificación sería una posible alternativa de solución al actual incremento de CO_2 observado. Por contrapartida, en el primer caso, los bioelementos quedarían liberados y pueden ser absorbidos por las plantas, mientras que en el último, los bioelementos quedarían atrapados en las sustancias húmicas y sólo lentamente serían utilizables por aquéllas. En el caso de materia orgánica originada o proveniente de subproductos agrícolas, urbanos o industriales, su origen y composición previa va a determinar su posible utilidad y uso, no existiendo normas generales. Similarmente, cuando se desea disminuir la actividad de elementos tóxicos llegados a un determinado medio, la aplicación de materia orgánica puede agravar o paliar el problema, dependiendo de las características particulares del contaminante.

Introducción

Uno de los temas ambientales recurrentes de actualidad es el de la mineralización (o pérdida) de la materia orgánica del suelo (MOS). Si a ello le añadimos otro tema en boga como es el secuestro del carbono (C) con vistas a disminuir el anhídrido carbónico (CO_2) atmosférico (que mitigue un supuesto calentamiento atmosférico), entramos de lleno en el ámbito de una línea prioritaria internacional como es el "Cambio global". Por tanto, en este artículo se pretende relacionar la MOS, dentro del ciclo global de C, con la posible contaminación atmosférica producida por los llamados gases invernaderos, principalmente CO_2 .

Se sabe que la Pedosfera (o Edafosfera) se produce en el solapamiento de otras esferas, a saber: Atmósfera, Hidrosfera, Litosfera y Biosfera. Ello hace que, aunque sea enormemente productiva, el conocimiento de la Edafosfera se muestre como muy complejo.

Si fijamos los límites de pH (entre 4 y 12) y E_H en la Biosfera (o en la Pedosfera) entre + 800 y - 600 mV, se obtiene que el C normalmente existe como CO_2 o, bien, en disolución bicarbonato (HCO_3^-), más difícilmente carbonatos (CO_3^{2-} , en suelos sódicos). Cuando la tensión de oxígeno (O_2) cae por alguna causa, puede aparecer metano (CH_4), aunque otros signos se manifiesten antes que se llegue a esas condiciones, como lo es la decoloración del suelo, por reducción de Manganeseo (Mn) e Hierro (Fe), o bien aparición de manchas, rojas o negras, en la matriz del suelo (precipitación de Mn y Fe oxidados).

Dado que la reducción es menos frecuente en los ecosistemas (manglares pantanosos, turberas), se puede establecer un ciclo general de C, donde obtendremos CO_2 en la atmósfera como dominante, C parcialmente reducido (carbohidratos) en la biomasa vegetal, C humificado (humus) en el suelo (en

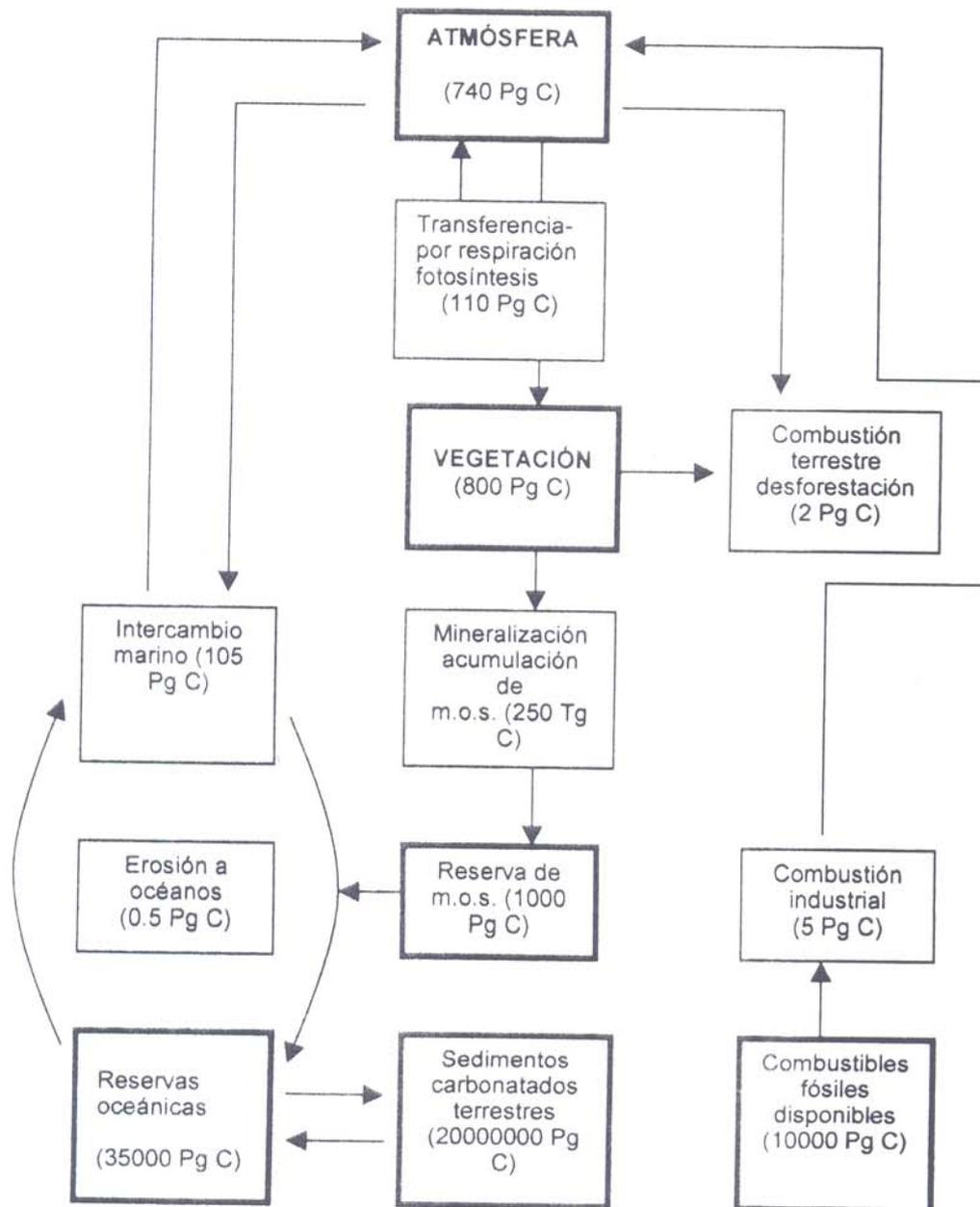


Figura 1. Cantidades estimadas por Schlesinger (modificado) de cada uno de los compartimentos y flujos que se pueden considerar (como más importantes) en el planeta Tierra.

algunos suelos, como los Aridisoles, también algo de C inorgánico en forma de carbonatos, cálcicos y magnésicos) y C fósil orgánico (combustibles fósiles) en la Litosfera; también existen enormes cantidades de C inorgánico (en forma bicarbonatada) en la Hidrosfera (océanos).

En la Figura 1 se muestran las cantidades estimadas por diversos autores de cada uno de los compartimentos y flujos que se pueden considerar (como más importantes) en el planeta Tierra.

Se entiende como **humus** o materia orgánica humificada a aquella fracción de la MOS que no es un compuesto orgánico con composición definida (no es un aminoácido, ni un ácido orgánico, ni tampoco biomasa microbiana viva), de color oscuro y bioestable; es decir, colorea de negro al suelo y permanece en el durante mucho tiempo, de siglos o milenios.

Obviamente la materia de origen del humus es el residuo orgánico que cae sobre el suelo (bien como hojarasca, rastrojo, deyecciones o restos de animales). Estos residuos sufren dos procesos paralelos: Uno de mineralización (primaria), con formación de compuestos inorgánicos (agua, CO_2 , nitrato, fosfato, sulfato, etc.) y otro de **humificación**, mediante el cual aparecen las sustancias negras y bioestables que denominamos humus. También el humus puede descomponerse muy lentamente, lo que se denomina **mineralización secundaria**, aunque a una velocidad despreciable frente a la aludida **mineralización primaria** (en climas templados o cálidos).

Aunque la cantidad de microorganismos existentes en el suelo es muy bajo, su número es altísimo (del orden de millones por gramo de suelo; véase Tabla 1). Este gran número de organismos en tan reducido espacio obliga a un "acuerdo" muy inflexible entre ellos (lo que entendemos por **equilibrio dinámico**), por lo que cualquier acción por romperlo inmediatamente tiene una respuesta inmediata tendiente a retornar al equilibrio (lo que llamamos **poder de amortiguación**). Obviamente un impacto sobre el suelo demasiado fuerte puede tener como consecuencia el rompimiento irreversible del equilibrio y en ese caso diríamos que se superó la "**carga crítica**", lo que supondría la degradación completa del suelo.

Los microorganismos edáficos son muy importantes por cuanto: a) descomponen la materia orgánica (vegetal o animal) y otros residuos orgánicos, con liberación de nutrientes; b) elaboran o conforman sustancias húmicas; c) mejoran las propiedades físicas edáficas (mucilagos); d) solubilizan nutrientes a partir de formas insolubles (ya sean minerales primarios o complejos orgánicos); e) fijan Nitrógeno (N) atmosférico; f) mejoran la nutrición radicular mediante formación de micorrizas; g) poseen un acción controladora (antagónica) de organismos patógenos; y h) compiten con las plantas frente a bioelementos.

Es fácil llegar a la conclusión que los microorganismos edáficos regulan la dinámica de la MOS; sólo repasando el listado anterior sobre la importancia de la microbiología edáfica y comparándola con la siguiente de la MOS, se verá que prácticamente se repiten; en efecto, repasando la importancia de esta última se tiene: a) suministra nutrientes; b) cementa las partículas, mejorando la estructura del suelo; c) altera la roca; d) disminuye la toxicidad; e) aumenta el poder amortiguador del suelo; y f) influye (indirectamente) sobre la nutrición de las plantas; además hay que añadir: g) la MOS es fuente de energía para los microorganismos; h) actúa como reserva de nutrientes; i) aumenta la retención hídrica; j) aumenta la absorción solar (oscurece el suelo); j) aumenta la capacidad de cambio catiónico; y, por último, k) incide indirectamente sobre el balance hídrico y los mecanismos de erosión.

De todas formas no olvidemos que lo que regula la actividad microbiana es la **temperatura y humedad ambiental**, por lo que éstos parámetros (más fácilmente medible que aquella) son idóneos para predecir los contenidos de MOS en las diversas situaciones climáticas. Cualquier desviación sobre la riqueza de MOS predicha puede indicar la existencia de algún otro factor limitante (impacto antropozoógeno excesivo, mal manejo edáfico, asfixia, drenaje defectuoso, salinidad, etc.).

Sin embargo, últimamente se le atribuye a la MOS un nuevo aspecto que, anteriormente y por lo general, se pasaba por alto: la fijación del C en el suelo, retirándolo de la atmósfera. Como es conocido, recientemente ha comenzado la preocupación que un aumento de la producción de los llamados gases invernadero (principalmente CO_2 y CH_4), podría incrementar la temperatura de la superficie terrestre unos grados, vaticinándose catástrofes sin límites. De ahí que se busque el cómo retirar (o secuestrar) dicho posible exceso de CO_2 atmosférico. Uno de los **sumideros de C** podría ser el suelo y, de ahí, nace la mayor importancia que cobra la MOS.

Como se sabe, la materia orgánica fresca (MOF, mayormente de origen vegetal) cae sobre el suelo y comienza a sufrir (por la actividad microbiana) un proceso de mineralización. Sin embargo, ese proceso va acompañado, como se dijo, de otro paralelo de humificación, mediante el cual aparecen sustancias bioestables de color negro (dada la abundancia de grupos cromóforos), generalmente por **polimerización** de sustancias orgánicas más simples de carácter diverso (polifenoles, aminoácidos, quinonas, etc.). Esta polimerización es más bien caótica, por lo que no puede atribuirse una fórmula determinada al humus y, en todo caso, conduce a formación de una sustancia orgánica y amorfa de alto

Tabla 1. Composición media y número de microorganismos estimados en un suelo fértil, regularmente provisto de materia orgánica (3.5 %).

Composición de la materia orgánica del suelo (MOS)	Número de individuos por mg	Masa (Mg ha ⁻¹)	Porcentaje sobre MOS (% en masa)	Masa (g m ⁻²)
Substancias orgánicas no humificadas	-	25	20	-
Substancias húmicas	-	100	75	-
Subtotal	-	125	95	-
Bacterias	1000000	3	1.5	450
Hongos	1000	3	1.5	1100
Actinomicetos	10000	1	1.5	45
Algas	1000	0.1	0.05	560
Protozoos	1000	0.1	0.05	170
Subtotal	1013000	7.2	4.6	2325
Nematodos	0.001	0.1	0.05	1
Anélidos	0.000008	0.5	0.3	10
Arácnidos	0.0000003	0.05	0.03	1
Insectos	0.0000008	0.5	0.3	10
Crustáceos	0.0000002	0.025	0.02	10
Subtotal	0.001	1.18	0.7	32
Mesofauna	0.0003	0.045	0.03	
Subtotal	0.0003	0.045	0.03	
Total	1013000	133	100	

Ratio MOS/biomasa entre 20 a 50.

peso molecular. Algunos autores han atribuido una estructura hueca y compleja a las substancias húmicas, tal y como se ve en la Figura 2 (arriba vista en tres dimensiones y debajo en dos). Lo interesante aquí es observar que, en esa estructura, se vislumbran unas especies de "arañas", con un cuerpo central más aromático y unas patas más alifáticas, que se unen a las patas de otras arañas. Las uniones son también de tipo químico (éteres, ésteres, amidos, etc.) o, simplemente, fisicoquímico (puentes de hidrógeno), lo que da mayor o menor resistencia a las uniones entre arañas o, bien, entre la pata y el cuerpo central de una araña. Ello indica que algunas partes de la molécula húmica es muy sensible a la acción de la hidrólisis sea ácida, sea (sobretudo) alcalina dado el carácter mayoritariamente ácido de la molécula húmica por la presencia de grupos carboxílicos (C_nH_m-COOH) o hidroxilos fenólicos (C₆H₅-OH).

Según otros autores (Figura 3) la parte del cuerpo de la araña sería de carácter aromático (asociándose a los **ácidos húmicos** del suelo), mientras que las patas tendrían un carácter más alifático (asociándose a los **ácidos fúlvicos** del suelo), pudiendo haber también algún grupo peptídico o aminoácido formando parte de dichas patas, entonces fácilmente hidrolizable y biodegradable.

Las sustancias pre-húmicas o húmicas que se estarían formando ya no están aisladas en la hojarasca o rastrojo sino que, con el contacto del suelo, se unen a otras micelas inorgánicas (principalmente **arcillas** y **sesquióxidos** de hierro y aluminio). También la presencia de **carbonatos**, hace que estas sustancias húmicas precipiten de inmediato (suelos calcimagnésicos). En el caso de las

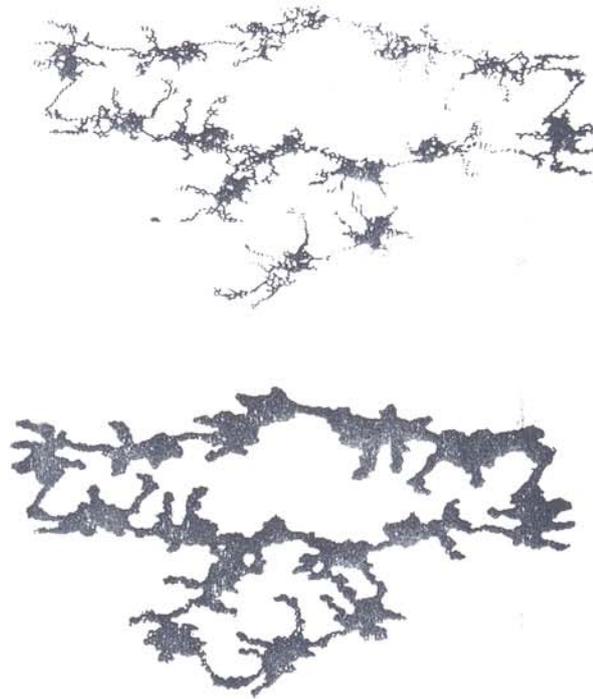


Figura 2. Estructura bi- y tri-dimensional de las sustancias húmicas.

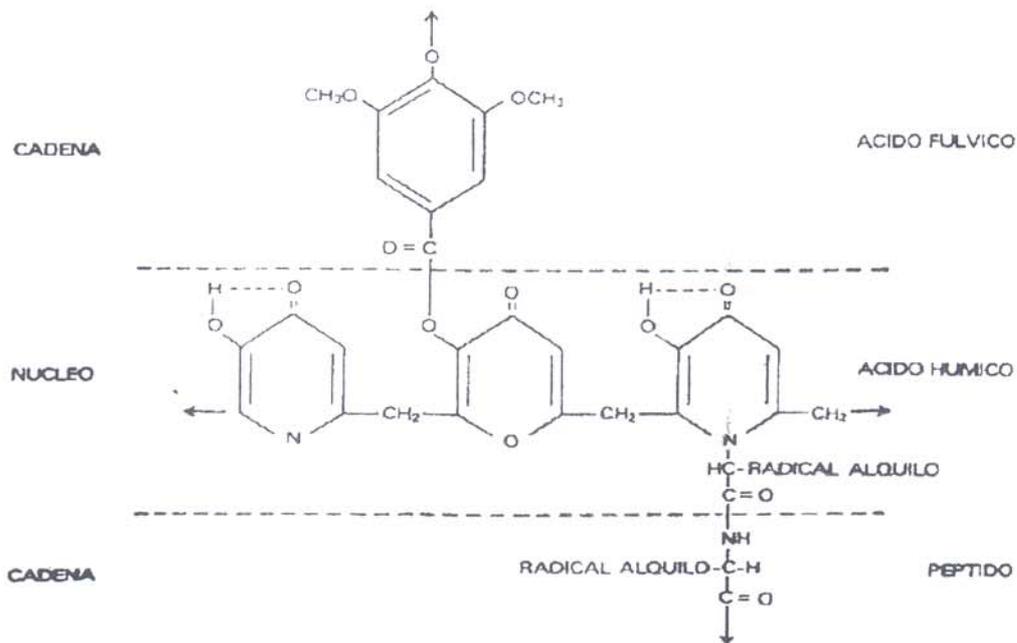


Figura 3. Estructura química de las sustancias húmicas (según Felbeck y Schnitzer).

arcillas, al tener también cargas residuales negativas, necesitan que hagan de puente de unión los cationes, siendo muy efectivo el Calcio (Ca^{2+}); sin embargo, la abundancia de Sodio (Na^+) hace que los humatos, en lugar de unirse a la micela arcillosa, se disperse (suelos alcalinos). Todos estos procesos

permiten la **maduración húmica** y la formación del **complejo arcillo-húmico**, que es lo que generalmente vemos en el suelo (no los ácidos húmicos aislados, aunque esto puede suceder en ciertos suelos como los suelos sódicos y ciertos Podsoles). A la vez que se forma el complejo arcillo-húmico las sustancias húmicas pueden madurar aún más, es decir, volverse aún más estables y más íntimamente unidas a cationes, arcillas, etc. (condensarse en/con la parte mineral del suelo), lo cual se ve favorecido si la climatología se caracteriza por tener estaciones definidas de sequedad y pluviosidad alternativamente.

No obstante, la formación de sustancias húmicas se ve favorecida por algunos **factores ambientales y edáficos** tales como la presencia de arcillas (preferiblemente de tipo 2:1), pH neutro (saturación por Ca^{2+} del complejo catiónico de cambio), o desfavorecida por la presencia de exceso de Na^+ , alta acidez (que limita la vida bacteriológica), o un potencial de oxido-reducción bajo (que solubiliza el Fe y el Mn). También las altas temperaturas ambientales tienden a mineralizar la MOS, mientras que una alta pluviosidad (humedad edáfica) tiende a acumular sustancias húmicas en el suelo. Ello origina que, en unos casos, la MOS tienda a mantenerse protegida por las arcillas, mientras que en otros la tendencia es a mineralizarse rápidamente, como sucede en los suelos de regiones cálidas (semiáridas o tropicales).

La agricultura, con el **laboreo**, aumenta la tensión en O_2 a la vez que suele disminuir las entradas del C al agrosistema y, por ello, decae el contenido en MOS. Eso es observado en general y, para paliar el empobrecimiento orgánico del suelo, tradicionalmente se añade estiércol (u otros residuos orgánicos sustitutivos) al suelo agrícola. Como el suelo agrícola ha establecido un nuevo equilibrio (con un tenor más bajo de MOS), la adición de estiércol o MOF ocasiona una explosión microbiana temporal (Figura 4) incrementándose la mineralización en el (nuevo) sistema. Tras la explosión microbiana ocurre una disminución tanto de la actividad microbiana (paralela a la desaparición de la MOS) como del contenido de MOS hasta que de nuevo se alcance el anterior equilibrio. Según sea la naturaleza de la MOF (menos humificada) o el estiércol (más humificado) la acción residual temporal de la materia orgánica añadida se extenderá menos o más (respectivamente) en el tiempo.

Esta repuesta a la **adición de MOF** (o cualquier otra acción cultural), ocasiona que obtengamos variaciones intra- e inter-anales de los contenidos de MOS que, en algunas ocasiones, es necesario determinar en el estudio de los agrosistemas. Obviamente todas las acciones de la **moderna agricultura** (¿agricultura sostenible?; ¿agricultura orgánica?; ¿agricultura ecológica?) van **encaminadas a aumentar el contenido de la MOS**, las mas de las veces con adición de MOF, otras veces con estiércol (cuando existe) y, recientemente, con "*compost*" (incluso lodos de depuradoras), que es cada vez más abundante en las sociedades urbanas que favorece el desarrollo económico. Éstos dos últimos productos tienen claras limitaciones (v.g.: metales pesados), pero es demasiado extenso desarrollar ahora éstas.

Es conocido que cuando cae la tensión de O_2 en el suelo, sea producida con una pérdida de estructura, el riego, por o anegación natural (más o menos temporal) de agua también disminuye la mineralización orgánica. Consecuentemente, y por lo general, se produce un aumento de la MOS como respuesta. Así, los suelos con peor drenaje (gleizados) suelen ser más ricos en MOS que los circundantes bien aireados, así como también los suelos bajo riego frente a los homólogos sin riego, aunque en este último caso la mayor producción vegetal ocasiona mayores entradas orgánicas, que coadyuvan a ese incremento de MOS. Una consecuencia es que la expansión de regadíos en el mundo (véase más adelante) está ocasionando un mayor "secuestro" de C, es decir, teóricamente una disminución del CO_2 atmosférico. La agricultura de "labranza cero", incluso mal planteada, suele originar incrementos de MOS, a veces simplemente por pérdida de la estructura superficial del suelo, lo cual puede perjudicar a medio plazo la cosecha por sus efectos indeseables (v.g.: asfixia radicular).

Por tanto, todo sistema (sea natural o agrosistema) tiende a mantener un **equilibrio en su contenido en MOS**, a no ser que cada año variemos drásticamente los impactos que se ocasionan al suelo. Este equilibrio no sólo se aprecia en el contenido superficial (horizonte *Ah* ó *Ap*) del suelo (epipedón), sino que también en la distribución vertical de la MOS (perfil orgánico). Así, mientras que los Podsoles tienen un perfil orgánico muy característico, los Mollisoles de clima continental (Chemozems,

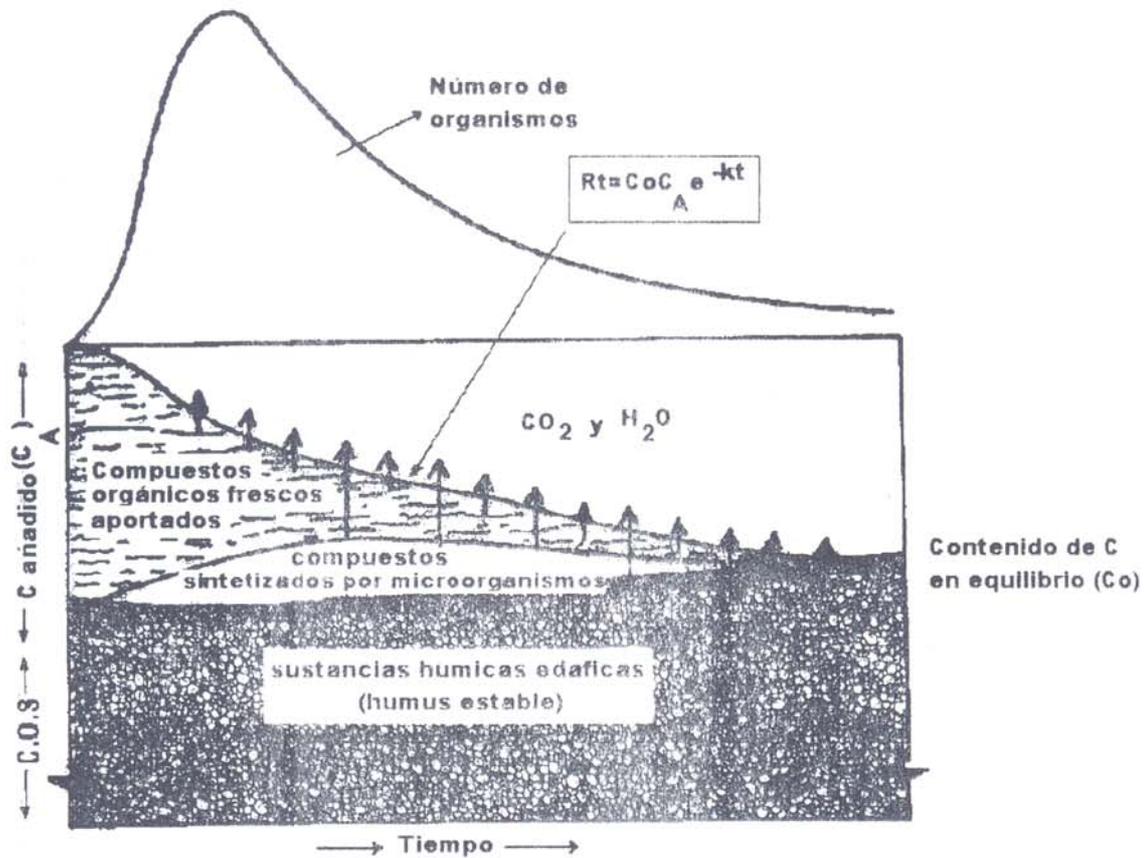


Figura 4. Modelo de reacción del suelo a una aportación orgánica externa.

praderas, pampas) tienen características isohúmicas (es decir, una disminución muy paulatina del contenido de MOS); a su vez, tanto los suelos de regiones semiáridas como, paradójicamente, los suelos tropicales ecuatoriales son pobres en MOS. Obviamente, todo esto está también modulado por otros factores, como la presencia de arcilla o la cantidad y distribución de las lluvias, por citar algunos. Es decir, que los factores formadores del suelo (clima, material parental, topografía, organismos y tiempo, unido al impacto antropozooógeno) determinan el **perfil orgánico**, pero, a su vez, la cantidad y calidad de la MOS condiciona la evolución y/o propiedades de los suelos.

Hoy día el mundo occidental desarrollado, bien cubiertas sus necesidades alimenticias, considera más el suelo como elemento a conservar (o ser utilizado como depurador ambiental) que ser un elemento productivo básico (la agricultura en el P.I.B. de los países desarrollados es raro que supere el 5 %), el **suelo se considera un recurso no renovable**, contrariamente a lo que se decía hasta hace pocos años. La **Edafosfera** ha pasado a ser denominada **Antroposfera** y el edafólogo se ha convertido en "experto" ambientalista. El agricultor, abandonado al pim-pam-púm de los ecologistas, se ha convertido, de ser considerado un probo productor, ahora es un convicto enemigo ambiental (erosiona, contamina, produce CO₂, simplifica la biodiversidad, etc.). Dentro de este contexto (u onda) la MOS ya no es considerada tanto un mejorador del suelo (con sus notables influjos sobre la estabilidad estructural edáfica y control de la erosión), como un compartimento (*pool*) donde se "secuestra CO₂" y se retira de la atmósfera.

Dado que el agricultor debe aumentar el contenido de MOS, este aumento ha de dirigirse, no hacia la **fracción "lábil"** de la MOS (transitoria), sino que más bien hacia la **"recalcitrante"** (resistente), lo cual puede tener ciertas repercusiones negativas, dado que los efectos agronómicos de la primera fracción son más evidentes que los de la segunda (en aspectos físicos y bioquímicos edáficos).

Sin embargo, en estas conversiones ideológicas se ha pagado un precio porque los edafólogos, quizás bien formados en Ecología terrestre, desconocen totalmente la Ecología marina; es decir, son **expertos en medio-ambiente** (sí, ciertamente, de la mitad del ambiente planetario). Así, puede que sus cálculos sean bastante aproximados en las medidas de las emisiones de CO₂, pero olvidan (desconocen) las absorciones de este gas por las aguas marinas, el cual es un flujo (y compartimento) de mayor orden de magnitud que las citadas emisiones. Luego sus predicciones aterradoras del calentamiento terrestre quizás se rebajaran de tono si se considerara todo el ambiente planetario, no sólo el medio-ambiente, es decir, la mitad de éste (mismamente, es mejor conocido el Hemisferio Norte desarrollado y más continental, que el Sur en vías de desarrollo y más oceánico).

No se debe olvidar que hay dos preceptos inmutables: Uno, que el **cambio climático** no es un proceso reciente sino que, al contrario, viene sucediendo desde la formación de la Tierra (durante el Pleistoceno han existido cuatro o cinco glaciaciones y, mismamente, en el Holoceno se han conocido periodos más fríos, alternados con otros más cálidos); y, el otro, que el **ciclo de C** es otra manera de medir el **flujo de energía** y, por tanto, que el nivel de vida de los países se puede medir indistintamente mediante la renta per-cápita, el uso de energía per-cápita, o el flujo de CO₂ generado per-cápita, por lo que la emisión de este gas va indisolublemente unido al mejoramiento del nivel de vida. La pregunta capital es si se admite que todo hombre al nacer tiene derecho (o no) a vivir lo mejor posible (es decir, a generar todo el CO₂ que pueda) o esto debe quedar restringido a los países que controlan el mundo o solo a ciertas clases sociales dirigentes.

En la Figura 1 se puede apreciar el orden de magnitud de cada compartimento y flujo existente en el planeta Tierra, según se dijo. Además, la Tabla 2 indica que los agrosistemas sólo significan un 12 % del C retenido en el suelo, porcentaje similar al también retenido en la tundra, suelos de praderas, estepas y bosques tropicales. Casi el doble de esa cantidad (un 22 %) se acumula en el suelo de los bosques templados; los bosques tropicales, a los que se les quiere poner un veto de corta, significan sólo el 17 % del total de C existente en el suelo en el planeta Tierra (entre 1400 y 1500 Pg).

El hombre, en su acción directa o indirecta (v.g.: por labores agrícolas o controlando la carga ganadera) puede influenciar algunos flujos de C (v.g.: emisiones de CO₂ provenientes del sector industrial), pero no otros (intercambios de CO₂ entre la atmósfera y el océano, compartimento de C marítimo, intercambios entre el CO₂ oceánico y rocas calizas sumergidas). Es decir, que la capacidad que tiene el hombre de influir sobre el contenido de CO₂ atmosférico (y el cambio climático) es bastante más limitado de lo que se suele afirmar. Las cifras que se manejan de los compartimentos de C terrestre adolecen de significativos errores (sólo hay que comparar las cifras procedentes de diferentes autores) y los flujos suelen tener sesgos por insuficiencia (contrastadas y buenas series) de medidas o, mismamente, desconocimiento de los exactos intercambios del CO₂ entre las fases gaseosas-líquidas-sólidas. La tecnología actual, no obstante, permite acercarse mucho en la precisión de los ciclos biogeoquímicos de algunos ecosistemas (principalmente europeos y norteamericanos), pero deja mucho de desear en el conocimiento de otros ecosistemas terrestres (tundras, pantanos, trópicos) o, mismamente, en la extrapolación de los valores encontrados para estos ecosistemas terrestres (bien conocidos) a la escala planetaria ("scaling-up"). No obstante, se muestran casos (véase Figura 5) donde en los últimos años se han observado un paulatino aumento de temperatura perceptible y una disminución de pluviosidad, pero es difícil separar qué es lo que se debe a un efecto local (propiciado por el influjo urbano), al cambio climático geológico (que viene sucediendo desde el Paleozoico), o a un posible aumento del CO₂ atmosférico.

Lo cierto es que las mayores **emisiones de CO₂** provienen de los EE.UU. de **Norteamérica** (24 % de las emisiones totales, debido a su alto nivel de vida, a pesar de su baja densidad humana) y **Europa Central y Occidental** (14 % del total, dados sus altos niveles de vida y de densidad humana); si sumamos **Japón** (5 % del total emitido) suponen casi la mitad de las emisiones mundiales; si a estos países se le añade China (14 % de las emisiones, no tanto por su nivel de vida, como por su altísima

Tabla 2. Contribución de diferentes ecosistemas al compartimento terrestre de la MOS (según Paul y Clark, modificado).

ECOSISTEMAS	Cantidad de C en suelo (Pg)	Porcentaje respecto al total mundial	Porcentaje según Schlesinger
Tundra	180	12.1	13.7
Bosques templados	N.d.	N.d.	9.5
Bosques fríos y templados	320	21.5	No detectado
Agrosistemas	180	12.1	12.0
Praderas y estepas isohúmicas	170	11.4	8.6
Humedales	140	9.4	14.5
Regiones desérticas	130	8.7	9.2
Sabanas tropicales	120	8.1	No detectado
Bosques tropicales	250	16.8	9.6
Total	1490	100	1400*

* Total en Pg

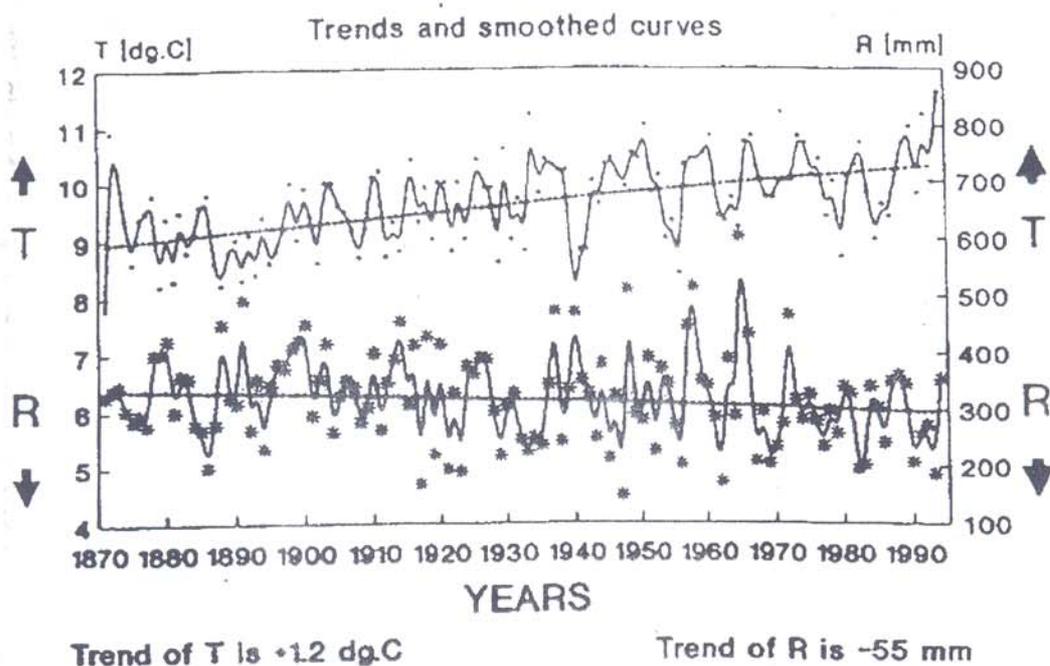


Figura 5. Evolución de la temperatura y pluviosidad en un lugar (Hurbanovo) de Eslovaquia, desde 1871 hasta 1994 (aumento de 1.2°C en la temperatura media y disminución de 55 mm de lluvia durante el verano; clima continental).

población); y Rusia (7 % del total, antigua superpotencia), se deduce que la gran mayoría de países mundiales tienen muy poca responsabilidad en la producción de CO₂, más bien al contrario, necesitan imperiosamente elevar su nivel de vida, sometidos a hambrunas recurrentes.

Entonces: ¿Se deben sacrificar la mayoría de los países en su deseo de vivir mejor (al menos como se vive en Grecia o España) para que no exista un temido **cambio climático terrestre**,

estancándose en su pobreza muchos de ellos? ¿Están disminuyendo realmente las emisiones de CO₂ en los países desarrollados? (evidentemente no...); ¿No supone mucho más incremento de CO₂ un aumento (de nivel de vida) del 1 % en Alemania que un 20 % en Argentina y, no digamos, el 500 % en Uganda?. Nos encontramos entonces no con un problema científico, que no lo es, sino con un claro problema político con una solución difícil (aún más que el control del precio de la energía...). Lo ideal sería que se estableciera un **máximo valor del ratio mundial de energía por persona**, pero esto es algo que no va a ser admitido por los países que controlan el mundo, o darán soluciones que no lesionen sus intereses... de vivir mejor (que los demás).

Hay otro hecho que no permite frenar el incremento de la continua emisión de CO₂: el continuo aumento de la población mundial. Aunque algunas naciones han detenido ese incremento al tener menos hijos al favorecerse el trabajo femenino (para vivir mejor: v.g.: Europa meridional) y otras han impuesto severas restricciones a la natalidad (v.g.: China), gran número de países de la tierra continúan su **explosión demográfica**, a veces alentadas por las clases dirigentes (mano de obra más barata) o las religiones (fanatismo). Al aparecer nuevos seres, éstos demandan más energía (y, si pueden, una mejor vida que la de sus antepasados), por lo que el incremento mundial de CO₂ no puede cesar tan fácilmente como se proclama, sino que continúa su imparable ritmo. Ese continuo aumento mundial de la población humana, igualmente, tiende a eliminar aquellos organismos (animales "poco útiles") que compiten con los nuevos nacidos por la energía; es decir, se coadyuva irremediablemente a la **extinción de especies**, por más que se creen parques naturales, grandes o pequeños: Mera cuestión de escalas.

Otros gases invernaderos (a excepción del CH₄) han podido ser frenados gracias a mejores tecnologías y nuevas exigencias de los países desarrollados. En el caso del CH₄ los remedios son inútiles, porque la mayor proporción de este gas proviene de emisiones naturales (pantanos, volcanes, rumiantes) o del cultivo del arroz; nadie en su sano juicio puede perisar que se debe evitar la emisión de CH₄ eliminando todos los rumiantes o prohibiendo el cultivo del arroz: Seguiremos emitiendo, por tanto, bastante CH₄ sin posible freno...

Dado que el agricultor, como digo, ha pasado a ser un convicto terrorista ecológico, debe pagar su pena fijando, como sea, el CO₂ producido durante su actividad; de ahí que se le haya encomendado **incrementar el C edáfico** (humus), no tanto (paradójicamente) para mejorar la estructura edáfica (y controlar la erosión) como se dijo al inicio, sino para disminuir el CO₂ atmosférico. De ahí los nuevos paquetes tecnológicos que ofrecen (los países desarrollados) de "agricultura orgánica o ecológica", "de labranza cero", etc., que, en el primer caso, producen productos más caros que sólo es posible adquirir por ciertas (altas) clases sociales (y países); es decir, su demanda es muy limitada o tendrá un cercano techo. No todas estas técnicas se pueden aplicar en todos los lugares (a pesar de la intensa propaganda a su favor), aunque en algunos casos tienen efectos positivos comprobados, pero también negativos (aparición de Cobre o Arsénico residual procedentes de la generosa aplicación de herbicidas o anticriptogámicos). Hay que tener en cuenta que el laboreo cero no existe, dado que, en todo caso, se siguen introduciendo diversas (y pesadas) maquinarias agrícolas (sembradoras, fertilizadoras, segadoras, etc.) que promueven la compactación del suelo (que es responsable, en parte, del incremento observado de MOS) en los agrosistemas, que hay que atajar en muchos casos.

Lo cierto es que los actuales **modelos propuestos** (Figura 6) de la evolución de la riqueza de MOS en el tiempo son bastante optimistas, motivados no sólo por mejores técnicas de laboreo y fertilización, sino por el incremento de las producciones (revolución verde) o la extensión de los regadíos. Así, en Japón el 60 % de las **tierras cultivadas** son **regadas**, un 30 % en Grecia, Holanda e Italia; un 25 % en Méjico, un 20 % en España y Portugal, y un 11 % en los E.E.U.U. de Norteamérica. Ello tiene como contrapartida que, salvo en Holanda, más del 60 % de las aguas utilizadas en esos países se gastan en regar (incrementando consecuentemente la MOS).

Tradicionalmente la disminución de la MOS en los agrosistemas ha sido compensada mediante el abonado (dado que el estiércol era relativamente abundante); la tendencia a la mecanización y urbanización de las sociedades ha ido haciendo cada vez más escaso el estiércol, a la vez que han aparecido **residuos sólidos orgánicos urbanos (RSOU)** y **lodos cloacales** para los que hay que hallar

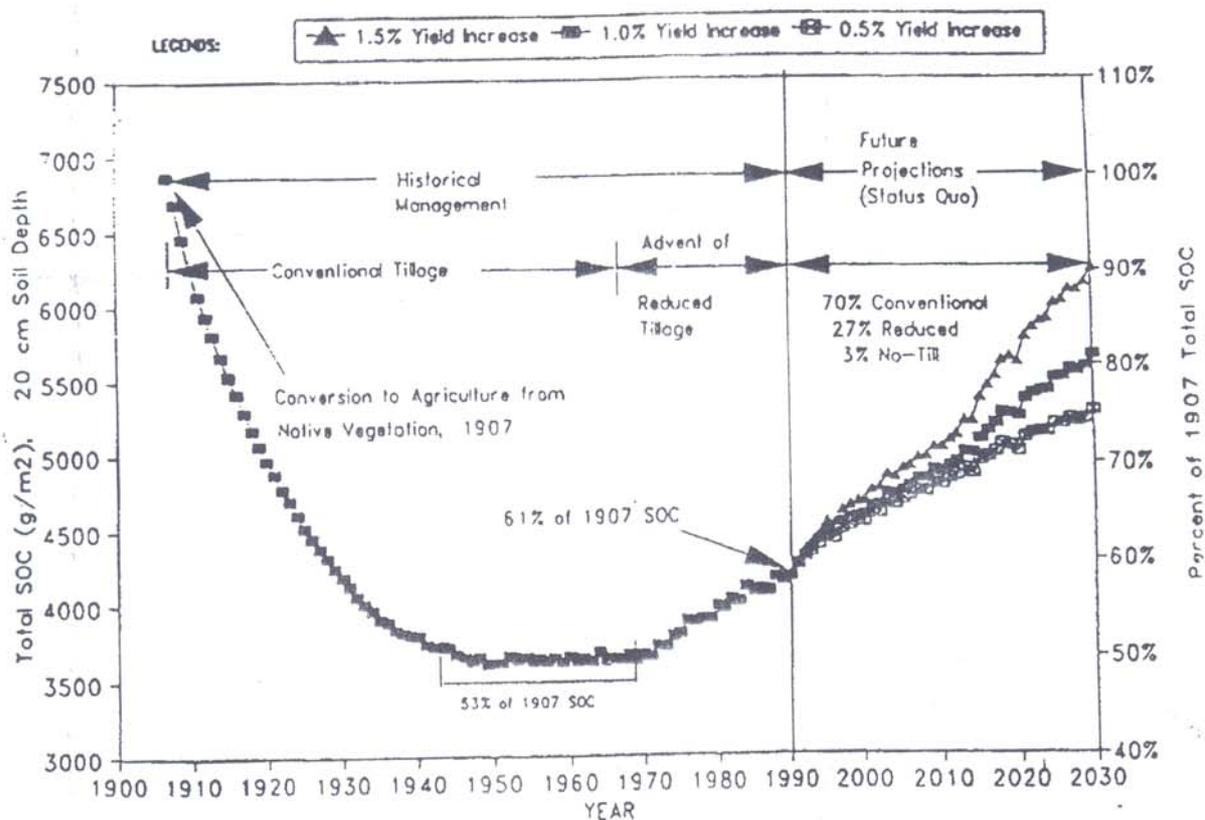


Figura 6. Proyección de la evolución del contenido de MOS en el Siglo XXI, según tres modelos.

y dar una salida viable. Por ello cada vez está más extendida la utilización de residuos orgánicos procedentes de subproductos de industrias agrícolas y "composts" procedentes de RSOU (a veces mezclados con lodos cloacales). Obviamente, hay que atender a las normas generales (y al sentido común) en el uso de tales productos:

- que su contenidos en nutrientes lo hagan recomendables (relaciones C/N entre 25 y 12).
- bajos contenidos en Cu, As, B y otros elementos problemáticos.
- buen compostaje (si es posible aeróbico, sin presencia de patógenos).
- si proceden de lodos, bajos contenidos en metales pesados y también libres de patógenos.
- alto contenido orgánico (>30 % C) y bajo de humedad (<30 %).
- no demasiado ricos en carbohidratos para promover una mayor permanencia en el suelo (buen contenido de sustancias pre-húmicas), etc.; y, por último, pero no el menos importante.
- un bajo (o aceptable) precio.

Así y todo, en las regiones semiáridas no es fácil encontrar residuos orgánicos para aplicar en el suelo; a veces recurren a "composts" producidos en zonas turísticas o a residuos de ganado estabulados; en todo caso, hay que seguir las recomendaciones anteriores, más el requisito de que posean baja salinidad.

A veces se ha hablado del "vermicompost" como una solución a la carencia de MOS. Obviamente este producto no es remedio de nada, porque el "vermicompost" será tan bueno o tan malo dependiendo de la facilidad de poseer abundantes y baratos residuos orgánicos, y, por descontado, de buena calidad. La lombriz sí puede tener efectos positivos en acelerar el proceso de obtener un producto final para usar

en el campo, pero hay que tener en cuenta que el contenido de los nutrientes que había en los residuos orgánicos que se usan de cama para la lombriz roja sólo se enriquecen (final y aproximadamente) al doble, por lo que si el residuo orgánico original era de mala calidad, el "vermicompost" lamentablemente seguirá teniéndola. Los volteos (y el control de la temperatura), tan importantes en el compostaje, se reducen en el "vermicompost" debido a la capacidad de movimiento de la lombriz, lo cual ahorra trabajo en el proceso. Pero, tanto el "compost" como el "vermicompost", deben mantener inamoviblemente sus características (y composición) en los puntos de venta (deben ser productos normalizados), así como cumplir con las exigencias de las normativas nacionales (máximos de humedad, de metales pesados, de *Escherichia coli*, de salinidad, etc.; mínimos de contenidos en C, N, P, K, Ca, etc.).

Un más estricto control se exige en el uso de los lodos cloacales por sus, generalmente, altos contenidos en metales pesados (aunque puedan ser atractivos desde el punto de vista de su riqueza en N y P) que obligan a ser precavidos en su adición al suelo. A veces, su uso puede verse restringido a un único aporte; otras veces, pueden usarse dejando intervalos de medios a largos periodos (v.g.: lustro). En todo caso exigen un buen control de metales pesados (acompañados de análisis del suelo), incluso de residuos orgánicos persistentes y potencialmente dañinos. Si se recomienda que los lodos sean utilizados en el compostaje, añadiéndolos a los RSOU.

La mayoría de los "composts" poseen bajos contenidos de sustancias húmicas (raramente superan el 5 %), dado que en el compostaje falta la parte inorgánica del suelo (y los contrastes climáticos) para su formación y maduración (obviamente es imposible la formación del complejo arcillo-húmico). En general, si aparecen valores superiores al 5 % de sustancias húmicas en la etiqueta del compost, más bien se refieren a sustancias pre- o para-húmicas ("humic-like substances"), no a verdaderos ácidos húmicos, hay que tener en cuenta estos equívocos comerciales y evitarlos con normas o legislación adecuada.

A veces, para evitar la pobreza (bastante general) en nutrientes de los composts, se encuentran en el comercio "compost enriquecido", al que simplemente se le ha añadido, mezclándolo, un fertilizante tipo NPK; incluso, si el "compost" original era pobre en micronutrientes, también se le añaden en algunos casos (aunque si se mezcló con lodos cloacales no suelen hacer falta, más bien lo contrario). En todo caso, los composts enriquecidos suelen ser más caros que los no enriquecidos. Por supuesto, hay que ver también en la etiqueta el contenido de humedad del producto orgánico, que a veces es demasiado alto y ello encarece (aún más) el producto orgánico útil o neto.

Por último, conviene advertir que, si existe abundancia de elementos tóxicos polivalentes un exceso de MOS, en algunos casos, puede favorecer la no presencia de formas tóxicas de éstos (v.g.: Cromo), pero en otros puede suceder justamente lo contrario (v.g.: Arsénico).

Referencias

- Burbano, H. 1989. El suelo: una visión sobre sus compuestos bioorgánicos. Universidad de Nariño, Pasto, 447 p.
- Clark, F. E. 1970. The microflora of grassland. *Advances in Agronomy*, 22: 375-435.
- Clark, F. E. 1971. Bacterias del suelo, 27-68 pp. In: Burges, N.A. y Raw, F. (Eds.). *Biología del suelo*. Omega, Barcelona.
- Clark, F. E and Paul, E.A. 1975. Biochemistry of the soil subsystem, 1-36 pp. En: Paul, E. A. and McLaren, A. D. (Eds.). *Soil biochemistry*, 3.
- Felbeck, G. T. 1971a. Structural hypothesis of soil humic acids. *Soil science*, 111: 42-48.
- Felbeck, G. T. 1971b. Chemical and biological characterization of humic matter, 36-59 pp. In: McLaren, A. D.; Shujins, J. (Eds.). *Soil biochemistry*. 2.
- Gallardo, J. F. 1989. El humus, 148-156 pp. En: Barea, J. M.(Ed.). *Biología vegetal*. Prensa científica, Barcelona.
- Kononova, M. M. 1986. *Materia orgánica del suelo*. Oikos – Tau, Barcelona, 565 pp.
- Piccolo, A. 1996. *Humic substances in terrestrial ecosystems*. Elsevier, Amsterdam, 594 p.
- Schlesinger, W. H. 1991. *Biogeochemistry: an analysis of global change*. Academic Press, New York, 444 p.

Mineralización y humificación de materia orgánica

- Schnitzer, M. 1971. Characterization of humic substances by spectroscopy, 60-95 pp. In: McLaren, A. D. and Skunins, J. (Eds.). Soil biochemistry, 2:
- Schnitzer, M. and Khan, S.U. 1978. Soil organic matter. Elsevier, Amsterdam, 320 p.
- Schulten, H.R. and Schnitzer, M. 1997. Chemical model structures for soil organic matter and soils. Soil science, 162: 115-130.