

Disertación del Académico Correspondiente

Dr. Ramón Rosell

Transformación de la materia orgánica en el suelo

Deseo expresarles que esta nominación como académico de la Academia Nacional de Agronomía y Veterinaria es para mí uno de los más altos honores recibidos en mis seis décadas de vida. Quiero agradecer profundamente las palabras generosamente elogiosas del Ing. Laurencena, del Dr. Ras y del Ing. Mizuno referidas a mi vida personal y a mis actividades académicas. Siempre he tratado de retribuir y cumplir con las múltiples oportunidades que las instituciones de nuestro país me han brindado y que han contribuido a mi formación científico-profesional en centros avanzados del mundo. Entre ellas coloco en lugar de privilegio a nuestra Universidad Nacional del Sur, de la que fui alumno fundador al iniciarse las actividades del Instituto Tecnológico del Sur en 1948, hace ya 43 años. Con profunda emoción quiero brindar mi homenaje a quienes me apoyaron en el devenir de los acontecimientos, especialmente a quienes ya emprendieron el viaje sin retorno, como mis familiares que descansan en Puan; el Dr. Antonio Pires, miembro activo y pilar de la Academia Nacional de Agronomía y Veterinaria por más de 3 décadas, al Ing. Agr. Julio C. Lucero, inspirador, fundador y ex-director de nuestro Departamento de Agronomía y a tantos otros cuya sola mención cubriría un espacio importante del conferido para esta exposición.

A continuación se presentará, empleando transparencias, un breve pantallazo sobre qué es la materia orgánica edáfica y sus efectos sobre la génesis, la fertilidad y la conservación de los suelos.

1. INTRODUCCIÓN

La fotosíntesis, por intermedio de la acción de la energía radiante constituye el proceso bioquímico fundamental y más importante cuali y cuantitativo del universo al producir la fijación del carbono (en forma de CO_2) y el agua para generar materia orgánica con elevado contenido energético. El carbono es el elemento clave de la vida siendo su ciclo la condición sine qua non para cualquier actividad biológica en el planeta. La fotosíntesis puede visualizarse como una inversión puntual de la tendencia universal hacia el caos o el desorden, en virtud de que produce una entropía negativa al formar un mayor ordenamiento molecular. La producción fotosintética de material orgánico es enorme: un metro cuadrado de hojas verdes sintetiza un gramo de azúcar por hora, lo cual equivale a un incremento neto de carbono orgánico (CO) de 15 veces la extracción actual de combustibles fósiles, cuando el cálculo se extrapola global y anualmente (Zehnder 1982). Aproximadamente el 0,1% (o sea 6×10^{10} millones de tn) de la corteza

terrestre está constituida por carbono (C) con la distribución que se presenta en la Tabla 1. La Figura 1 muestra el contenido de carbono de los compartimientos principales de la tierra y la estimación de las velocidades anuales de intercambio entre ellos.

La dinámica global del C puede dividirse en dos ciclos:

uno biológico y otro geológico. El ciclo biológico es relativamente corto pero muy activo en comparación con el ciclo geológico. Este último estuvo en equilibrio hasta que el hombre comenzó a quemar combustibles fósiles, lo que adiciona a la atmósfera 5×10^{15} g C por año, o sea alrededor del 7% del carbono liberado de la biósfera por descomposición y respiración.

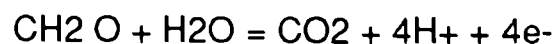
La mayor parte del C del CO₂ asimilado vuelve a la atmósfera por diferentes vías. La radiación solar mantiene activo al ciclo proveyendo energía que es acumulada por medio de la fotosíntesis, al formarse moléculas orgánicas a partir de compuestos minerales simples. Los organismos heterotróficos se alimentan con esas moléculas; al morir, los constituyentes orgánicos son mineralizados nuevamente por los microorganismos cerrándose así el ciclo. El humus es la principal reserva terrestre de carbono. Sus constituyentes poseen propiedades físico-químico-biológicas diferenciales que son responsables de cambios y actividades fundamentales del suelo. Por ello el propósito de esta revisión es presentar algunas características del humus y su participación en el nivel de fertilidad del suelo.

2. BALANCE TERRESTRE DEL CARBONO

La dinámica del CO₂ en los 20 cm superficiales de un suelo de pradera templado se presenta en la Figura 2.

Las sustancias húmicas constituyen el compartimiento principal (con 99 t m C ha⁻¹) de este sistema. Las plantas asimilan durante el día y respiran parte de él durante el día y en la noche. La diferencia entre ambos procesos se denomina "producción primaria neta", siendo su corolario la síntesis de material vegetal. Parte de la planta es consumida por animales y el resto se incorpora al suelo, sufriendo procesos de transformación (humificación y mineralización primaria) conducentes a la síntesis de humus. La mayor parte de la materia orgánica edáfica es el humus, un producto microbiológico de carácter amorfo, oscuro, hidrofílico, ácido, polidisperso, con volumen molecular elevado (mayor de 500 Daltons hasta decenas de miles de Daltons) y que se encuentra íntimamente asociado a la materia mineral final del suelo.

El humus es a su vez descompuesto lentamente (mineralización secundaria) por intermedio del sistema microbiológico que contribuyó a su génesis. En medio aeróbico los productos finales son oxianiones, dióxidos de C y elementos esenciales para la nutrición de las plantas, los cuales son absorbidos por vía radical. En medio anaeróbico, el proceso conduce a formación de compuestos ricos en carbono (petróleo, hulla, antracita, grafito, etc.) (Figura 3). La materia orgánica y el humus son termodinámicamente metaestables. El producto final es CO₂. La Tabla 2 contiene ejemplos típicos de la secuencia redox de la transformación de materiales orgánicos. Los microorganismos actúan como catalizadores de la reacción cuya forma general es:



Los electrones de esta reacción son transferidos a diferentes aceptores,

según los organismos y condiciones ambientales, liberando, simultáneamente energía química que es utilizada para mantener funciones vitales. La Tabla 2 muestra que dichas reacciones ocurren en función de sus posibilidades termodinámicas (ver Zehnder, 1982, para otras reacciones como la reducción del manganeso, hierro y protón: amonificación de nitratos, fermentación, etc.).

La materia orgánica del suelo, especialmente el quasi-estable humus, experimenta, luego de decenios, centenios o milenios, las transformaciones mencionadas. El manejo del suelo por el hombre puede alterar el curso de esos eventos, produciéndose así fenómenos de degradación ambiental de consecuencias negativas para la humanidad.

3. DEFINICIONES SOBRE LA MATERIA ORGÁNICA

Los términos materia orgánica y humus se emplean indistintamente en agricultura. Sin embargo, a juicio del autor, el primero es más amplio y, consecuentemente, incluye al segundo. Además, es esencial incluir en la denominación de materia orgánica al componente responsable de las transformaciones biológicas y bioquímicas de los residuos orgánicos, o sea, a los microorganismos (algas, bacterias, actinomicetos, hongos, etc.) e invertebrados que constituyen la denominada biomasa edáfica (excluidas las raíces vivas de las plantas).

El humus, también denominado sustancias húmicas, puede ser separado operacionalmente en fracciones de acuerdo con su solubilidad en ácidos, álcalis y solventes orgánicos (Tabla 3).

Stevenson (1982a), Aiken et al. (1985),

Hayes et al. (1989) y otros autores han presentado revisiones completas sobre extracción, fraccionamiento y propiedades y comportamiento de la materia orgánica y del humus en suelos y en ambientes naturales, a los cuales es referido el lector para mayores detalles.

4. CLASIFICACIÓN DEL HUMUS

Los investigadores europeos han formulado una clasificación del humus que se ajusta a las condiciones ambientales variables de ese continente. Esa clasificación está basada en la morfología de los horizontes orgánicos, que es la resultante de los dos procesos fundamentales de la evolución de la materia orgánica: la mineralización y la humificación. Tanto la naturaleza de los productos formados como su grado de interacción con la matriz mineral son elementos importantes de esa clasificación (Duchaufor, 1975).

4.1 Los factores biológicos

Constituidos por los microorganismos y la actividad animal (artrópodos, lombrices, etc.) que son responsables de la mineralización y humificación de los residuos orgánicos. De esos factores biológicos dependerá la importancia relativa de los dos horizontes relacionados con el humus: AO, el horizonte orgánico superpuesto al suelo mineral, incompletamente descompuesto, con estructura vegetal parcialmente visible y Ah o Al, horizonte mixto a la vez mineral y orgánico, de estructura y aspecto muy variables según el tipo de humus. El horizonte AO, cuando tiene mucho espesor (ciertos mor), puede estar subdividido en varias capas: L o AOO (hojarasca), F (capa de fermentación) y H (capa humificada).

4.2 Las condiciones microclimáticas

Las que también inciden directamente sobre la mineralización y la humificación. Esta circunstancia ha llevado a la mayoría de los clasificadores a distinguir el humus formado con predominio de aerobiosis, que comprende tres grandes tipos: mull, moder y mor y el humus que se genera en anaerobiosis o humus hidromorfo: anmoor (anaerobiosis temporal) y turba (anaerobiosis permanente). En la Tabla 4 se presenta un resumen de la clasificación europea del humus presente en los suelos de ese continente.

5. PROPIEDADES DEL HUMUS

La proporción relativa de fracciones húmicas es una característica, dentro de ciertos límites, de los grandes grupos de suelos (Kononova, 1966). La variación de la relación ácido húmico: ácido fúlvico y/o C de ácido húmico: C de ácido fúlvico (Ch:Cf) para diferentes suelos se aprecia en la Tabla 5. Ese cociente está relacionado con la intensidad de humificación de la materia orgánica. Orlov (1985) demostró que la relación Ch:Cf mostraba una tendencia a valores paralelos a los valores del periodo de actividad biológica (PAB) de la región bajo estudio. El PAB se obtiene a partir de la diferencia entre el número de días con temperatura mayor de 10° C y el número de días con estrés hídrico, ambos tomados en el lapso de un año en la región ecológica pertinente. En la Tabla 5 se presentan la intensidad de humificación (cuantificada por la relación Ch:Cf) y la estimación del valor del PAB, expresada en días.

Existe consenso de que el humus es una mezcla heterogénea de compuestos y en que no es posible definir una estructura, simple o compleja, que sea

representativa. Más aún, hay investigaciones que sostienen que no hay dos moléculas iguales de humus en el ambiente.

La fracción ácido fúlvico posee propiedades diferentes de la fracción ácido húmico.

La primera posee menor peso molecular, mayor contenido de oxígeno, de grupos funcionales que contiene oxígeno y de capacidad de intercambio catiónico (CIC) que las últimas (Tabla 6). La solubilidad en agua y el elevado contenido de acidez total y de grupos funcionales con propiedades secuestrantes del ácido fúlvico lo ubican en condiciones preeminentes para participar activamente en procesos relacionados con el movimiento de iones y, por ende, con la génesis, fertilidad y dinámica del suelo.

La distribución del C entre los principales grupos funcionales es una rama de la físico-química del humus que ha recibido gran atención en los últimos años. Hatcher et. al. (1983) y Wershaw (1985) han presentado recientemente una revisión de la aplicación de la resonancia nuclear magnética (NMR) del hidrógeno (H) y del carbono 13 para dilucidar la estructura del humus de diferente origen. Empleando la técnica CP/MAS (cross polarization magic angle spinning) esos autores proveen una medición cuantitativa de la distribución del C en grupos aromáticos, alifáticos, carboxílicos, carbonilos, cetónicos, etc. y en carbohidratos. En este trabajo no se discutirán los principios, técnicas e interpretación del procedimiento NMR. Sin embargo, se mencionarán los últimos resultados obtenidos mediante su empleo (Malcom, 1990). Este autor concluye que:

a) las sustancias húmedas del suelo son primariamente alifáticas y no predominantemente aromáticas, como

se creía hasta el presente;

b) la lignina no es probablemente la principal fuente de aromaticidad del humus edáfico;

c) la sustancia húmicas de ríos y lagos no son originarias de los suelos adyacentes y, por ende, no tienen un origen terrestre sino fluvial y

d) hay diferencias definitivas de composición entre los ácidos húmicos y flúvicos de ambientes edáficos, fluviales y marinos.

6. INDICES Y COEFICIENTES DE HUMIFICACIÓN

6.1 Coeficientes de mineralización y de humificación

La transformación de los residuos orgánicos se cumple en dos procesos casi coincidentes en el tiempo: la mineralización (primaria y secundaria) y la humificación de los residuos orgánicos. La mineralización primaria ocurre relativamente rápido y concluye con la formación de humus "estable" en pocos años (en 1 a 2 años en clima húmedo) templados y suelos bien aireados; 2-3 o más años en climas templados semiáridos; en menos de 1 año en suelos con clima tropical húmedo). La mineralización secundaria del humus "estable" produce una transformación menor y más lenta, con una media del orden del 0.5 al 2% del total en el término de un año, según sean las condiciones climáticas y de suelo. Bajo labranzas convencionales se puede perder anualmente entre el 1 y el 3% del humus "estable" mientras que labranzas mínimas o descomponen menos del 0,5% de ese humus "estable".

Ambos tipos de mineralización poseen características comunes. Por ejemplo, producen nutrientes en formas fácilmente absorbibles por las raíces de las plantas.

La característica diferencial de ambos procesos se manifiesta en la velocidad y cantidad de la transformación. La cuantificación del proceso se realiza por medio del empleo de dos coeficientes de transformación:

- El coeficiente K1 isohúmico, que permite establecer la proporción de humus "estable" que se generará en el suelo a partir de la mineralización primaria de los residuos orgánicos, bajo condiciones promedio de clima templado y precipitaciones (500-800 mm por año). La Tabla 7 presenta el coeficiente K1 de algunos materiales y el 12% del abono verde permanecen como humus "estable" luego de su mineralización.

- el coeficiente K2 representa la fracción o porcentaje del humus "estable" edáfico que se descompone, transforma o mineraliza anualmente. Este coeficiente K2 depende también de las condiciones ecológicas siendo más alto en climas cálidos con húmedos, en suelos bien aireados con pH neutro (entre 6 y 8), en suelos con labranzas que facilitan la alteración y oxidación del humus, etc. La Tabla 8 muestra el coeficiente K2 (o tasa anual de mineralización) del humus "estable" de varios suelos. El coeficiente K2 brinda, entonces, información sobre la descomposición del humus "estable", la eventual pérdida de la estructura y el peligro de erosión del suelo.

El estado más conveniente del suelo se logra cuando su materia orgánica joven posea altos coeficientes K1 (de humificación o isohúmicos) y bajos coeficientes K2 (de mineralización o descomposición del humus "estable").

6.2. La relación C:N

La relación C:N se emplea para estimar el nivel de humificación de los residuos orgánicos o materia orgánica joven y de los materiales compostables. Las

especies con residuos ricos en N y con C:N relativamente bajo (olmo, fresno, leguminosas) liberan, casi al mismo ritmo, CO₂ y nitrógeno mineral, de forma que el C:N permanece casi constante o desciende en forma muy gradual: el humus formado es muy activo en la producción de N mineral. En los suelos cultivados la relación C:N es característica de la microflora presente tendiendo a estabilizarse en los valores 9 a 11. La incorporación de restos con relación C:N muy alta, por ejemplo, paja de cereales, hace que la microflora libere el C en exceso en forma de CO₂ y fije el N mineral en forma orgánica, restándole ese nutriente a los cultivos. Lo inverso ocurre cuando se incorporan al suelo materias relativamente ricas en N con relaciones C:N menores de 20.

Durante la mineralización (secundaria) del humus la relación C:N se mantiene constante, indicándose así una interrelación importante entre el C y el N frente a los agentes microbiológicos.

6.3 La interrelación C, N, Po, So

El nitrógeno, el fósforo (P) y el azufre (S) son importantes macronutrientes vegetales. La mayor parte del N y el S (salvo en suelos salinos) y hasta tres cuartas partes del P se presentan en forma orgánica (So, Po) en los suelos. La Tabla 9 presenta información sobre la concentración total y la proporción relativa de C, N, Po y So en la materia orgánica de suelos de varios países.

La absorción radical de estos nutrientes se produce, generalmente, en las formas iónicas generadas por la reacción.

	mineralización	
(C, N, P, S) orgánicos		CO ₂ ,
NH ₄ ,		NO ₃ , H ₂ PO ₄ , SO ₄
	inmovilización	

Walker y Adams (1959) postularon que el contenido de P del material parental controla los niveles de materia orgánica, N y S del suelo, dado que este puede recibir C, N y S desde la atmósfera quedando limitada la provisión de P a su fuente inorgánica (o al aporte de los fertilizantes).

La relación C:N:Po:So puede variar de un suelo a otro. Sin embargo se observa que el valor de esa relación tiende a hacerse constante regionalmente (con materiales originales y condiciones ecológicas similares). En general la relación C:Po es más variable que las relaciones C:N y C:So. Esa variabilidad parece ser consecuencia del tipo de unión con el humus y la mayor movilidad del ión fosfato. Por esa razón la producción de nutrientes a partir de la mineralización del humus no es uniforme, liberándose a veces una proporción mayor o menor de N que de Po cuando se los compara con la relación en el material original. Esa conducta disímil se explica por alguno de los siguientes mecanismos:

6.3.1 El N, Po y So se encuentran en fracciones diferentes de la materia orgánica y, por esa razón, no son mineralizados (o movilizados) en proporciones y relaciones similares.

6.3.2 Los residuos orgánicos contienen proporciones variables de N, Po y So y, consecuentemente, poseen velocidades diferentes de mineralización (o inmovilización).

6.3.3 La generación neta de NH₄ y NO₃ está confundida por la fijación del primero y la desnitrificación del segundo.

6.3.4 La producción neta de H₂PO₄ y SO₄ está confundida por la formación de sales insolubles (fosfatos de Ca).

Uno de los factores más importantes responsables de la producción diferencial de nutrientes son las relaciones C:N, C:P_o y C:S_o de los componentes de la materia orgánica. Es así que se producirá la mineralización (con la incorporación de esos nutrientes en la biomasa y el humus) de acuerdo con las siguientes relaciones:

- mineralización de la materia orgánica y liberación de nutrientes sucede cuando C:N es menor de 20 y C:P_o y C:S_o son menores de 200.

- **inmovilización** de los nutrientes ocurre cuando C:N es mayor de 30 y C:P_o y C:S_o son menores de 200.

- **inmovilización** de los nutrientes ocurre cuando C:N es mayor de 30 y C:P_o y C:S_o son mayores de 300.

- existe un equilibrio entre ambos procesos cuando C:N oscila entre 20 y 30 y C:P_o y C:S_o son del orden de 200 a 300.

7. EFECTO DEL CULTIVO (LABRANZA Y ROTACIÓN) SOBRE LA MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO.

Ciertas prácticas de manejo del sistema suelo-planta, como por ejemplo las labranzas y el empleo intensivo de cultivos, pueden ocasionar efectos negativos sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Eso es consecuencia de cambios en los flujos de temperatura, humedad y aireación; disminución de la materia orgánica; y aumento de la rotura de agregados y de la erosión del suelo.

Los suelos nativos y/o vírgenes se caracterizan por alcanzar un determinado nivel de materia orgánica en equilibrio con las condiciones ambientales. La rotura y uso agrícola de estos suelos, en cualquier latitud, conduce a la pérdida gradual de la

materia orgánica hasta alcanzarse un nuevo equilibrio. La Figura 5 presenta un excelente ejemplo, centenario, del efecto de varias rotaciones y la cultivación en las famosas parcelas Morrow de la Universidad de Illinois, EE.UU. (Stevenson, 1982 b). Numerosos estudios muestran una caída relativamente rápida de C y N luego de los primeros 10-30 años de cultivo (Doughty et al., 1954; Horner et al., 1960; Rasmussen et al., 1980; Tiessen et al., 1982; Odell et al., 1984), Jenny y Raychaudhuri (1960) cuantificaron una pérdida del 65% de la materia orgánica del suelo en la India Martín y Cox (1956), demostraron que un suelo arcilloso (Vertisol) en Queensland, Australia, perdió 0,8% del N por año en los 15 cm. superficiales durante 25 años. Russell (1981) registró pérdidas anuales de hasta el 5% del N en otro suelo vertisol cultivado con sorgo (**Sorghum bicolor L.**) durante 10 años. Andriulo et al. (1966) demostraron, en un suelo Argiudol típico de Córdoba, Argentina, que la concentración inicial de materia orgánica en los 5 cm superficiales se mantuvo a 34 g/kg bajo siembra directa, pero que decreció el 13% bajo labranza convencional (quema del rastrojo y arada con rejas) en un sistema de doble cultivo trigo (**Triticum sp.**) - soja (**Glycine max L.**) luego de 11 años.

Miglierina et al. (1988) cuantificaron las pérdidas de C, N y P extractable (P_e) de un suelo Haplustol étnico de la región semiárida pampeana cultivado con tres cereales y pastoreado con ganado durante 69 años y colocado bajo tres sistemas de rotación a partir de 1975. El primer control se realizó 11 años después, en 1986 (Tabla 10). Las pérdidas de C, N y P_e fueron del orden de 14, 30 y 19%, respectivamente, al comparar la pradera virgen (V) con el suelo bajo agricultura (Ch) en los 15 cm

superficiales durante 69 años. A esos valores hay que adicionar las nuevas pérdidas ocasionadas por tres diferentes rotaciones, durante los últimos 11 años (1975-1986), que fueron 15, 17 y 13% de C; 17, 13 y 10% de N y 59, 64 y 60% Pe para los sistemas A (Trigo-cultivos), E (Trigo-pastoreo, alternados anualmente) y D (Trigo-pasturas para heno alterados cada 4 años), respectivamente. Los autores concluyeron que las pérdidas de materia orgánica son aún importantes varias décadas después de iniciarse la agricultura en las praderas pampeanas nativas y que los sistemas de rotación, aún aquellos que poseen leguminosas para heno en la rotación, contribuyen en diferente grado a la continuación del proceso de degradación del humus (Tabla 10).

La pérdida de materia orgánica del suelo puede evitarse y aún revertirse empleando sistemas de producción que incluyen labranzas verticales periódicamente, para atenuar los problemas derivados de la compactación del suelo, producción elevada de residuos y la aplicación generosa de fertilización y abonos orgánicos (estiércol). Jenkinson y Johnson (1977) demostraron un aumento significativo del N edáfico luego de la aplicación continuada durante más de 100 años de 35 tn. de estiércol por hectárea y por año a un suelo cultivado con cebada en la Estación Experimental de Rothamsted, Inglaterra. Las parcelas que fueron establecidas en 1852, no habían alcanzado aún un nivel estacionario 123 años después, en 1975. El testigo no fertilizado mostró cambios ligeros en el nivel de N. Las parcelas que recibieron estiércol hasta 1871 indicaron una caída gradual posterior de N (Figura 6).

Wagner (1990) presentó datos obtenidos en Sanborn Field, Universidad de Missouri, donde en 1950 se introdujo maíz

fertilizado en parcelas que habían contenido cultivos forrajeros durante los 61 años anteriores. Por medio de la determinación del isótopo estable C-13 con BMR se pudo distinguir en el suelo el origen de la materia orgánica (pradera original, forrajes y maíz) luego de cultivar maíz durante 36 años consecutivos hasta 1986 (Figura 7). Los residuos de maíz permiten compensar la pérdida de humus del forraje a partir de 1950. La mayor caída del humus del forraje, que mostró una vida media de 10 años entre 1950 y 1986, ocurrió en los primeros 12 años desde que se inició el cultivo de maíz. En 1986, el 34% del C del humus edáfico provino del maíz, el 9% de los forrajes y el 57% de la pradera nativa.

8. CONCLUSIÓN

La experiencia obtenida en Sanborn Field, Universidad de Missouri (Wagner, 1990), luego de más de 100 años de agricultura, es representativa de numerosos estudios similares (Jenkinson y Johnson, 1977; Stevenson, 1982 b) Sobre la dinámica de la materia orgánica edáfica. A continuación se mencionan los puntos más salientes de esos estudios:

8.1 El monocultivo, aún el de leguminosas, tiene efectos negativos sobre el nivel de materia orgánica y la estabilidad física del suelo.

8.2 La rotación de cultivos atenúa la velocidad de degradación del suelo, pero no la frena si no se incorporan elementos esenciales por medio del uso de fertilizantes y/o enmiendas orgánicas.

8.3 El nivel adecuado de materia orgánica neutraliza el efecto de compuestos tóxicos para las plantas (tema no discutido aquí)

8.4 La cantidad y calidad del humus depende del sistema de producción (labranzas y rotaciones de cultivos)

8.5 La fertilización repone los elementos extraídos por las plantas. Sin embargo subsuperficies que poseen baja capacidad de retención de agua que afectará la productividad de los cultivos subsiguientes

8.6 La erosión del suelo puede controlarse manteniendo un nivel adecuado (por ejemplo más de 2% en peso) de materia orgánica y aplicando sistemas conservacionistas (no destructivos) de laboreo de las tierras.

BIBLIOGRAFIA

- Aiken G.R., McKnight D.M., Wershaw R.L. y MacCarthy P. 1985 Humic substances in soil, sediment and water. J. Wiley and Sons, 692 pp.
- Andriulo A.E. Rosell R.A. y Crespo M.B. 1986. Effect of tillage on organic matter properties of a soil of central Argentina. *Sci. Total Environ.* 62, 153-456.
- Doughty J.L., Cook F.D. y Warden F.G. 1954. Effect of cultivation on the organic matter and nitrogen content of brown soils. *Canadian J. Agric. Sci.* 34, 406-411.
- Duchaufour P. 1975. Manual de Edafología, Toray-Masson, Barcelona, 476 pp.
- Hatcher P.G., Breger I.A., Dennis L.W., and Maciel G.E. 1983. Solid-state ^{13}C NMR of sedimentary humic substances: New revelations on their chemical composition. En *Aquatic and terrestrial humic materials* (Christman R.F. and Gjessing E.T., eds.), Ann Arbor Science, Ann Arbor, MI, 37-82.
- Flaig W., Beutelpacher H. y Rietz E. 1975. Chemical composition and physical properties of humic substances. En *Soil Components, Vol. I; Organic components* (Gieseking I. E., ed.), 1-211.
- Hayes M.H.B., MacCarthy P., Malcolm R.L. and Swift S.S. (eds.) 1989. Humic Substances II. In search of structure. J. Wiley and Sons, 778 pp.
- Henin S. y Dupuis M. 1945. Essai de bilan de la matière organique du sol. *Ann. Agron.* 15, 17-29.
- Horner G.M., Overson M.M., Baker G.O. y Pawson W.W. 1960. Effect of cropping practices on yield, soil organic matter, and erosion on the Pacific NW wheat region. Washington, Idaho and Oregon. *Agric. Exp. St. and ARS-USDA Cooperative bulletin.* Pullman, Wash.
- Jenny H. y Raychaudhuri S.P. 1960. Effect of climate and cultivation on nitrogen and organic matter reserves in Indian soils. Indian Council of Agricultural Research, New Delhi.
- Jenkinson D.S. y Johnson A.E. 1977. "Soil Organic Matter in the Hoosfield Continuous Narley Experiment". En *Rothamsted Exp. Sta. Report for 1976 Parte 2*, Harpenden, Herts, Inglaterra, 81-101.
- Konnova M.M. 1966. Soil organic matter. pergamon Press, 450 pp.
- Malcom R.L. 1990. The uniqueness of humic substances in each of soil, stream and marine environments. *Anal. Chim. Acta*, 232, 19-30.
- Neptune A.M.L., Tabatabai M.A. y Hanway. 1975. Sulfur fractions and C-N-P-S relationships in some Brazilian and Iowa soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 39, 51.
- Odel R.T., Melsted S.W. y Walker W.M. 1984. Change of organic carbon and nitrogen of Morrow plot soils under different treatments, 1904-1974. *Soil Sci.*, 137, 160-171.
- Orlov D.S. 1985. Humus acids in soils. Oxonium Press Ltd., New Delhi, 378 pp.
- Parton W.J., Anderson D.W., Cole C.V. y Steward J.W.B. 1983. Simulation of soil organic formation and mineralization in semi-arid agroecosystems. En *Nutrient cycling in agricultural ecosystems* (Lowrance R.R. et al., eds.) Spéc. Pub. 23, The Univ. Georgia, College of Agriculture Exp. Str., Athens.
- Rasmussen P.E., Allmaras R.R., Redhe C.R. y Roager Jr. N.C. 1980. Crop residue influences on soil carbon and nitrogen in a wheat fallow system. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 44, 596-600.
- Rosell R.A. y Andriulo A.E. 1988. Distribución de carbono y nitrógeno orgánicos, formas de fósforo y pH de un suelo bajo tres manejos. *Agrochimica* (Italia), XXXIII (3), 194-201.
- Russell J.S. 1981. Models of long term soil organic matter change. En *Simulation of nitrogen behaviour of soil-plant system* (Frissel M.J. y Van Veen J.A., eds.), Center for Agricultural Publishing and Documentation, Wageningen.
- Stevenson F. 1982 a. Humus Chemistry. J. Wiley and Sons, 443 pp.
- Stevenson F. 1982 b. Origin and distribution of nitrogen in soil. En: *Nitrogen in Agricultural soils* (Stevenson J.F., ed.), Amer. Soc. Agron., Madison, Wis., 1-42.
- Tiessen H., Stewart J.W.B. y Bettany J.R. 1982. Cultivation effects on the amounts and concentration of C, N and P in grassland soils. *Agron. J.* 74, 831-835.
- Wagner G.H. 1990. Long-term studies indicate differences in stability of soil organic matter.

Better crops with Plant Food, Winter 1989/90, Vol LXXIV (74), 1, 21-23.

Wershaw R.L. 1985. Application of NMR Aspectroscopy for determining fuctionality in humic substances. En humic sibstances in soil, sediment, and water. (Aiken et al. eds.). J. Wiley and Sons, 561-582.

Walker T.W. y Adams A.F.R. 1958. Studies on spoil organic matter: 2. Influence of increased leaching at various stages of weathering on levels of carbon, nitrogen, sulfur and organic ant total phosphorus. Soil Sci. 85, 307.

Williams C.H., Williams E.G. y Scott N.M. 1960. Carbon, nitrogen, sulfur and phosphorus in some scottish soils. J. Soil Sci. 11, 334-346.

Zehnder A.J.B. 1982. The carbon cycle. En Environmental chemistry. (Hutzinger O., ed.), Vol. 1, Part B. The natural enviroment and the biogeochemical cycles. Springer Verlag, 83-110.

Tabla 1. Balance Mundial del Carbono (Zehnder, 1982).

Deposito de carbono	Contenido del Carbono (10 ⁹ tm)	Tiempo Medio de residencia (años)
Atmósfera		
Dióxido de carbono	648	+4
Metano	6,24	3,6
Monóxido de carbono	0,23	0,1
Desconocido	3,4	
Total atmósfera	657,87	
Terrestre		
Biomasa viva (plantas)	827	+16
Humus, biomasa edáfica y residuos	1200	+40
Total tierra	2027	
Océanos		
Biomasa viva (plantas)	17,4	0,07
Carbono orgánico suspendido (20 ug. l ⁻¹)	30	
Carbono orgánico disuelto	1000	
CO ₂ /HCO ₃	38400	385
Total océanos	39447,4	
Litósfera		
Carbonatos	60,90 x 10 ⁶	
Material orgánico fosil (Carbono y petróleo= 104 tm)	12,48 x 10 ⁶	342 x 10 ⁶
Total litósfera	73,38 x 10 ⁶	

Tabla 2. Secuencia Redox de la reducción biológica de la materia orgánica

Reacción	Potencial Redox, mV
Respiración aeróbica CH ₂ O + O ₂	CO ₂ + H ₂ O 810
Respiración nitrada (dentrificación) CH ₂ O + 4/5 NO ₃ + 4/5 H ⁺	CO ₂ + 2/5 N ₂ + 7/5 H ₂ O 750
Reducción del Fe CH ₂ O + 4 FeOOH + 6H ⁺	FeCO ₃ + 3Fe ⁻ + 6H ₂ O - 100
Respiración sulfatada CH ₂ O + 1/2 SO ₄ ⁻ + 1/2 H ⁺	CO ₂ + 1/2 HS ⁻ + H ₂ O -220
Metanogénesis CH ₂ O + 1/2 CO ₂	CO ₂ + 1/2 CH ₄ -250

* Ver Zehnder (1982) para una serie completa de reacciones y sus respectivos cambios de energía libre (- G) por mole de electrones intercambiados (Kj mol⁻¹, kilo Joules por mol)

Tabla 3. Definiciones de la Materia Orgánica y el humus (Stevenson, 1982).

Residuos Orgánicos o Materia Orgánica Joven: Tejidos de plantas y animales y sus productos de descomposición parcial.

Biomasa Edáfica: Materia Orgánica presente como Tejido Microbiano Vivo.

Substancias Húmicas o Materia Orgánica Vieja o materia Orgánica "Estable" o Humus: Substancias orgánicas del suelo con exclusión de los residuos orgánicos y la biomasa edáfica. Estas substancias poseen pesos moleculares relativamente altos, son de color pardo oscuro y fueron formadas por reacciones secundarias de síntesis.

Substancias No Húmicas: Compuestos orgánicos con características bioquímicas definidas como aminoácidos, carbohidratos, grasas, ceras, resinas, ácidos orgánicos, etc.

Humina: La fracción del humus insoluble en álcalis.

Acido Húmico: La fracción del humus extraíble del suelo con varios reactivos e insoible en medio ácido.

Acido Fulvico: La fracción colreada del humus que permanece en solución luego de la separación del ácido húmico por acidificación.

Acido Hematomelanico: La fracción del ácido húmico soluble en alcohol.

Tabla 4 - Tipos y propiedades del humus. Clasificación europea (Duchaufour, 1973)

Tipo	Horizonte (profundidad)	Estructura	pH	C:N	Saturación de bases (%)	Fauna y Microflora	Mineralización (Nitrificación)	Humificación
Mull cálcico y forestal	A1 (10-100cm)	Agregados	7	10-12	90-100	Lombrices y bacterias y actinomicetos	Rápida	Activa; complejos organo-mineralés; humina abundante
Moder	OL (2-3 cm) A1	Agregados débiles	4-5	15-25	20-50	Artrópodos y hongos acidófilos	Media	Media; complejos Me-fúlvicos; poca humina
Mor (humus bruto)	OL (5-10 cm) A1 (2-5 cm)	Fibrosa	3.5-4.5 25	30-40	10	Acaros, colémbolos y hongos acidófilos	Lenta	Abundancia de ácidos orgánicos y fúlvicos; poca humina.
Anmoor	OL (5 cm) A1 (variable)	Masiva	Variable	20	Variable	bacterias anaeróbicas	Lenta	30% de MO1 humificada
Turba	OL (variable)	Fibrosa	7 - 7.5	15-30	Casi saturado	bacterias anaeróbicas	Muy lenta	MO parcialmente humificada, rica

1) MO, materia orgánica

Tabla 5. Intensidad de humificación y período de actividad biológica (PAB, días) en los principales órdenes de suelos (Orlov, 1985)

	Suelo	En Horizonte A1		Días con:		PAB (días)
		C %	Ch:Cf	Temp. 10°C	estrés hídrico	
I.	Tundra	1.7	0.48	50	-	50
II.	Podzol gley	1.9	0.54	70	-	70
III.	Podzol	0.4	0.70	92	-	92
IV.	Sod-podzol	1.7	0.75	110	-	110
V.	Bosque gris	3.1	1.10	130	-	130
VI.	Chernozem típico	4.9	2.40	154	-	154
VII.	Chernozem común	4.2	2.90	170	-	170
VIII.	Castaño	1.5	1.63	190	50	140
IX.	Pardo semidesértico	0.7	0.59	215	125	90
X.	Gris pardo	0.3	0.44	210	137	73
XI.	Serozem (bajo carbonato)	0.4	0.53	210	137	73

Tabla 6. Grupo funcionales que contienen oxígeno en fracciones húmicas de diversos suelos. Valores en cmol kg⁻¹

Grupo funcional	Acido Húmico	Acido Fúlvico
Acido total	560-890	640-1420
-COOH	150-570	530-1120
-OH ácido	210-570	30-570
-OH ácido + alcohólico	20-490	260-950
=C=O (quinónico + cetónico)	10-560	120-420
-OCH ₃	30-80	30-120

Tabla 7. Coeficiente Isohumínico K1 de algunos materiales orgánicos

Material	Coeficiente K1
Turba baja	1
Turba alta antigua	0.96
Turba alta reciente	0.85
Estiércol descompuesto 6 meses	0.45
Estiércol descompuesto 15 semanas	0.35
Alfalfa	0.25
Paja de cereales	0.15 - 0.18
Abonos verdes	0.12

Tabla 8: Tasa anual de mineralización del humus

Suelo o Humus	Coeficiente K2 x 100
De región templada	1.5
Bajo riego en regiones cálidas	2 - 3
Arcilloso	1
Franco limoso	1
Franco	1.5
Arenoso	2
De cultivo hortícola templado	2
De cultivo hortícola tropical	3
cultivo de invernáculo	4
bajo labranza convencional (arado, etc.)	5
Bajo labranza mínima (reducida)	0 - 0.5
Bajo labranza cero	0.1
Materia orgánica joven	60 - 80
Materia orgánica vieja (humus)	2

Tabla 9. Concentración total y proporcional relativa de N, P y S orgánicos de suelos.

Origen	Total N, %	P, ug g-1	S, ug g-1	C : N : Po : So
Marcos Juarez, Arg. (1)	0,18	429	-	112:10:1.2:3
Brasil (2)	0,27	145	147	194:10:1,2:1,4
Iowa, EUA (2)	0,24	300	304	110:10:1,4:1,2

Nueva Zelandia (meteorizado) (3)	0,30	240	380	206:10:0,8:0,3
Escocia (4)	0,24	334	330	140:10:2,3:1,4

(1) Andriulo y Rosell, 1986

(2) Neptune y col., 1975

(3) Walker y Adams, 1959

(4) Williams y col., 1960

Tabla 10.- Contenido y pérdida de C, N y Pe de un suelo haplustol entico virgen y cultivado (Miglierina et al., 1988)

Cultivo	Años de Cultivo	Contenido o pérdida	N	Pe
V, pradera virgen	0	cantidad, Mg ha-1	4.3	0.069
Chx, control Dif. V-Ch	69	Cantidad, Mg hs-1	3.0	0.056
		Pérdida, Mg hs-1	1.3	0.013
		Pérdida, %	30	1
A(W-C)xx	80	Cantidad, Mg ha-1	2.5	0.023
		Pérdida, Mg ha-1	0.5	0.033
		Pérdida, %	17	59
E(w-g)xxx	80	Cantidad, Mg ha-1	2.6	0.020
		Pérdida, Mg ha-1	0.4	0.036
		Pérdida, %	13	64
D(w-h)xxxx	80	Cantidad, Mg ha-1	2.7	0.022
		Pérdida, Mg ha-1	0.3	0.034
		Pérdida, %	10	60

xCh, control cultivado (Medicago nativa, Hordeum vulgare, Avena sativa) y pastoreado, alternativamente, durante aprox. 70 años hasta 1974.

xxA (w-c), como Ch y luego sembrado con trigo (labranza conservacionista) y varios cultivos, alternativamente, desde 1974.

xxxE (w-g), como Ch y luego sembrado cada 2 años con trigo (labranza convencional) y pastoreo con animales los años sin cultivo.

xxxxD (w-h), como Ch y luego sembrado con trigo (4 años, labranza conservacionista) y con pasturas (Medicago sativa, Phalaris y Festuca sp.; 4 años), alternativamente y, eventualmente, pastoreando.