

**XXX CURSO INTERNACIONAL DE EDAFOLOGIA
Y BIOLOGIA VEGETAL**

**IMPLICACIONES DEL HUMUS
EN REACCIONES Y PROCESOS
DE INTERES AGRONOMICO Y
MEDIOAMBIENTAL**

Joaquín García Mollá

- I.- INTRODUCCION
 - I.1.- Aspectos generales de las relaciones Humus-Fertilidad y Humus-Medioambiente.

- II.- PROBLEMÁTICA DE LA DEFINICIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS DISTINTAS FORMAS DE MATERIA ORGÁNICA PRESENTES EN EL SUELO
 - II.1.- Separación de Sustancias Húmicas.
 - II.2.- Modelos de Formación de las Sustancias Húmicas.

- III.- ACTIVIDAD DE LA MATERIA ORGÁNICA EN LOS SUELOS CON ESPECIAL REFERENCIA A LA FUNCIÓN DE LAS SUSTANCIAS HÚMICAS
 - III.1.- Influencia sobre las condiciones físicas del suelo.
 - III.2.- Influencia sobre la planta y demás organismos vivos.
 - III.2.1.- Efectos directos:
 - a) Regulación de los ciclos biogeoquímicos del C, N y P.
 - b) Efectos fisiológicos. Hechos y especulaciones
 - III.2.2.- Efectos indirectos:
 - a) Interacción con iones metálicos y coloides inorgánicos.
 - b) Interacción con productos xenobióticos orgánicos.

- IV.- ENMIENDAS Y FERTILIZANTES ORGÁNICOS. CASO PARTICULAR DE LOS HUMATOS COMERCIALES

- V.- CONCLUSIONES

1.- INTRODUCCION

Entre los muchos factores naturales que determinan la productividad de un suelo, la presencia del Humus es quizás el más importante. Dicha importancia está implícita en la propia definición clásica de suelo, que reconoce al Humus como la única y constante característica que distingue al suelo fértil, como medio para el desarrollo de la planta, de la roca madre.

Por otra parte, la materia orgánica del suelo además de influir en procesos edafogénéticos (alteración de la roca madre, génesis de perfiles, etc) y microbiológicos, también influye en importantes procesos ecológicos relacionados con la degradación y/o conservación de ecosistemas terrestres.

El Humus puede ser considerado como un registro de parámetros de interés ambiental o como fuente de información sobre los mismos, como tendremos ocasión de ver más adelante.

Existe una amplia documentación histórica que muestra la consistencia del binomio Humus-Fertilidad, asociado por algunos autores incluso al desarrollo de civilizaciones. Pero refiriéndonos a las bases conceptuales de la Ciencia del Suelo moderna, puede afirmarse que la materia orgánica juega

un papel preponderante en la fertilidad de los suelos mediante diversas acciones de tipo físico, químico y biológico que variarán de un suelo a otro en función de la naturaleza del mismo, el clima, técnicas culturales, regímenes de aprovechamiento, sistemas de laboreo, técnicas de gestión, etc.).

Las opiniones sobre la importancia cuantitativa de la función del humus se han cambiado sustancialmente a lo largo del tiempo, pasando de ser preponderante a ser desdeñada tras los trabajos experimentales de Liebig que impusieron el exclusivismo de la "nutrición mineral", hasta las ideas actuales que reconocen al Humus un papel específico en la reserva, movilización y regulación de la absorción de nutrientes por las plantas.

Hoy día, incluso, cuando los excedentes agrarios de la economía occidental han ido mentalizando a gestores, agricultores y científicos hacia una Agricultura de conservación en la que prima sobre la cantidad la calidad de los productos agrarios y la protección ambiental, o cuando es cada día más popular en los países más desarrollados la llamada agricultura biológica, que no hace uso de ningún tipo de aditivo químico.

El papel del humus pasaría a un mayor grado de importancia si se tiene en cuenta que es la principal fuente natural de nutrientes. En este sentido una gestión racional de la biomasa residual para conseguir un aumento del Humus sería sin duda una práctica conservacionista que debería potenciarse.

El binomio Humus-Medio Ambiente tiene connotaciones más recientes pero no por ello menos conocidas. La intrínseca estabilidad frente a la biodegradación de las fracciones del humus más evolucionadas es uno de los factores de conservación de ecosistemas. Igual puede afirmarse de los efectos estabilizadores de una adecuada cubierta vegetal, dependiente de los niveles del Humus y sus beneficiosos efectos.

II.- PROBLEMATICA DE LA DEFINICION Y CARACTERIZACION DE LAS DISTINTAS FORMAS DE MATERIA ORGANICA PRESENTES EN EL SUELO

Antes de exponer el estado actual de conocimientos sobre el complejo y variado papel que desempeña la materia orgánica (MO) en el suelo es necesario referirse a la confusión terminológica y conceptual tradicionalmente asociada a su estudio, y que aun hoy día sigue siendo fuente de controversias. De hecho, gran parte de las dificultades planteadas en el conocimiento de la naturaleza de los diversos tipos de MO y sus funciones tiene su origen en la ambigüedad e inconsistencia de las definiciones usadas.

Durante años los términos humus, materia orgánica de suelos y sustancias húmicas han sido continuamente redefinidos, y en muchos casos usados erróneamente como sinónimos, dando lugar a un cierto caos, en palabras de Waksman, que ha empezado a resolverse recientemente.

La fracción orgánica del suelo constituye un sistema complejo de sustancias cuya dinámica viene determinada por el continuo aporte al suelo de residuos orgánicos de origen vegetal o animal, y su progresiva transformación bajo la acción de factores principalmente biológicos pero también, en

cierto grado, de factores abióticos. Posee, por tanto, una extraordinaria complejidad estructural, variable en función de la incidencia de los agentes externos que influyen en su formación.

Para facilitar su discusión sería necesario subdividirla en grupos de sustancias que idealmente poseyeran características estructurales o químicas similares. Una primera aproximación es la subdivisión del total del Humus del suelo en dos grandes grupos, Sustancias Húmicas y Sustancias no Húmicas.

Las Sustancias no Húmicas pertenecen a grupos químicos bien definidos, tales como proteínas y sus productos de descomposición (péptidos y aminoácidos), hidratos de carbono, ácidos orgánicos, grasas, ceras, resinas, etc. En general estas sustancias experimentan rápidas transformaciones debido a que el ataque de los microorganismos se produce con relativa facilidad, y el tiempo de permanencia en el suelo suele ser relativamente corto.

Las Sustancias Húmicas (SH) no pueden adscribirse a ninguno de los grupos existentes en la Química Orgánica. Constituyen una serie compleja de macromoléculas orgánicas

heterogéneas, de origen predominantemente biogénico, que se encuentran en todos los medios terrestres y acuáticos.

Se ha estimado su contenido global en suelos señalando que es del orden de 10^{14} Tm y constituye junto a las distintas formas de materia orgánica fósil, el grupo de sustancias orgánicas más abundantes del Planeta.

Una característica común de las SH es su alta resistencia a la degradación por microorganismos. Sus tiempos de residencia oscilan en el rango de los milenios. Por esta razón y por la falta de una distinción clara entre las diversas fracciones, algunos autores actuales se refieren a las mismas como "materia orgánica refractaria"

Como una solución operativa ampliamente aceptada porque no hace alusión a propiedades estructurales, las SH suelen subdividirse en tres fracciones de acuerdo con su solubilidad, y que posteriormente desarrollaremos:

- * Ácidos húmicos, solubles en álcalis pero insolubles en medio ácido.
- * Ácidos fúlvicos, solubles en soluciones alcalinas y ácidas.

- * Huminas, que no pueden ser extraídas directamente del suelo por soluciones ácidas o alcalinas.

Un cierto número de subfracciones pueden también obtenerse por extracción con disolventes o adición de electrolitos.

Las fracciones húmicas obtenidas por diferentes procedimientos o aisladas de diferentes sustratos, pueden diferir significativamente en su composición química.

La fracción de humina es la menos conocida y representa a menudo la fracción orgánica más abundante del suelo, pero su completa extracción y determinación cuantitativa es problemática debido a su naturaleza heterogénea y a los fuertes enlaces químicos y físicos con los componentes minerales.

La humina del suelo puede ser parcialmente aislada por disgregación ultrasónica de los microagregados del suelo, liberando la llamada humina heredada, que ha sido considerada tradicionalmente como proveniente de la alteración de la lignina por demetoxilación y carboxilación. Las investigaciones actuales, sin embargo, destacan el importante

papel de biopolímeros alifáticos vegetales o microbianos en su composición.

Aunque las SH no representan una clase químicamente uniforme de sustancias, sin embargo presentan una serie de propiedades físico-químicas típicas.

A lo largo de la ya larga historia de la Geoquímica del Humus, se han propuesto diversos modelos para explicar su estructura, propiedades y comportamiento. Así por ejemplo, recientemente se ha desarrollado un modelo para explicar las interacciones con compuestos hidrofóbicos que considera a las SH como agregados de tipo micela. Las propiedades físicas y químicas de estos agregados sería más una función de la estructura de los agregados que de las propiedades de los componentes individuales. Estos agregados ordenados están compuestos por componentes moleculares de biopolímeros parcialmente degradados cuyo interior estaría ocupado por la parte más hidrofóbica de las moléculas constituyentes, mientras que las superficies exteriores estarían constituidas por los grupos más polares. En un apartado posterior, desarrollaremos más detalladamente los dos tipos de modelos propuestos, que explican la formación de las SH.

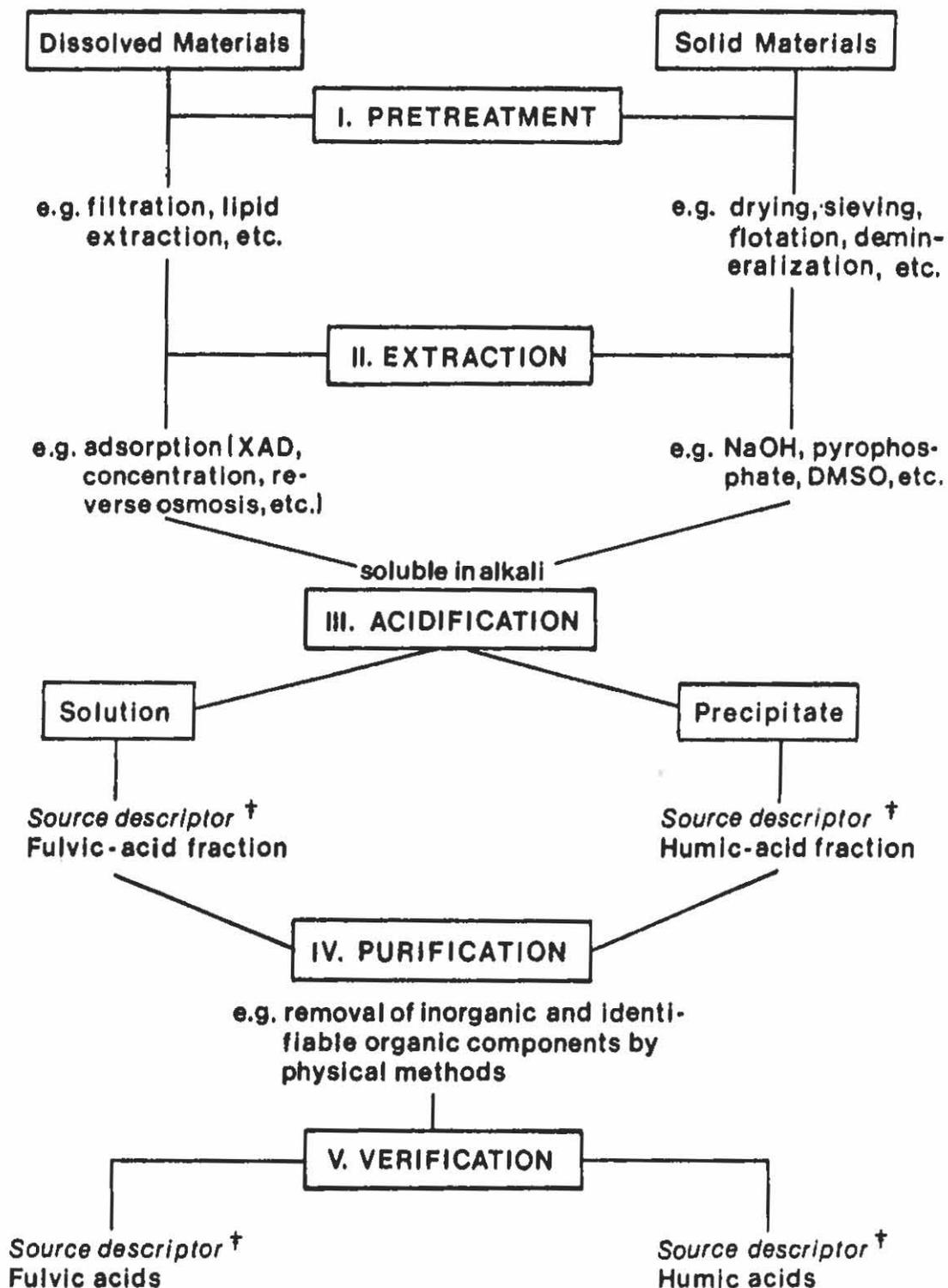
II.1.- Separación de Sustancias Húmicas.

En la gráfica se observa cada uno de las etapas propuestas para la separación de las sustancias húmicas.

Pretratamiento: Incluye la preparación de la muestra para la extracción de los ácidos húmicos y fúlvicos. Para suelos, el pretratamiento típico es, la separación por densidad de los fragmentos, secado, tamizado y desmineralización por tratamientos sucesivos con HCl y HF. Por otra parte, las muestras acuosas, en un principio son filtradas y posteriormente acidificadas con HCl a pH 2.0. Si se encuentra contaminada, será extraída con disolventes o con resina a pH neutro. Las muestras que proceden de otra tipo de fuentes, como son los sedimentos, reciben otros procedimientos diferentes de pretratamiento, como por ejemplo la liofilización.

Extracción: La extracción típica en suelos es la separación de una fracción soluble en álcalis. Normalmente se usa NaOH y pirofosfato. También suelen utilizarse disolventes orgánicos tales como dimetilsulfóxido y metilisobutil cetonas. Aunque estas extracciones con disolventes orgánicos no son alcalinas, producen una fracción de materia orgánica

A Guide to Nomenclature of Humic Substances



que es soluble en disoluciones alcalinas.

Las muestras acuosas pueden ser tratadas con técnicas de sorción en columna, o por otros mecanismos de concentración de muestras, como el intercambio iónico, liofilización, etc. Aunque pueden ser manejados otros procedimientos de extracción, este esquema de separación de la International Humic Substances Society (IHSS) es el más utilizado para la separación de suelos (G. R. Aiken).

Acidificación: Los extractos solubles en álcalis son acidificados a $\text{pH} < 2.0$ con HCl , originando la precipitación. La centrifugación se realiza para separar las muestras en dos fracciones, ácidos fúlvicos y ácidos húmicos.

Purificación: Ya que la estructura de las sustancias húmicas no es conocida, el término "purificación" es utilizado en un sentido diferente al usual, referido a la separación de materiales orgánicos e inorgánicos no húmicos por métodos físicos.

La Purificación es necesaria para separar sustancias que se encuentran unidas a los extractos húmicos por enlaces físicos, no covalentes (sales, metales, lípidos,

polisacaridos, ácidos grasos, etc).

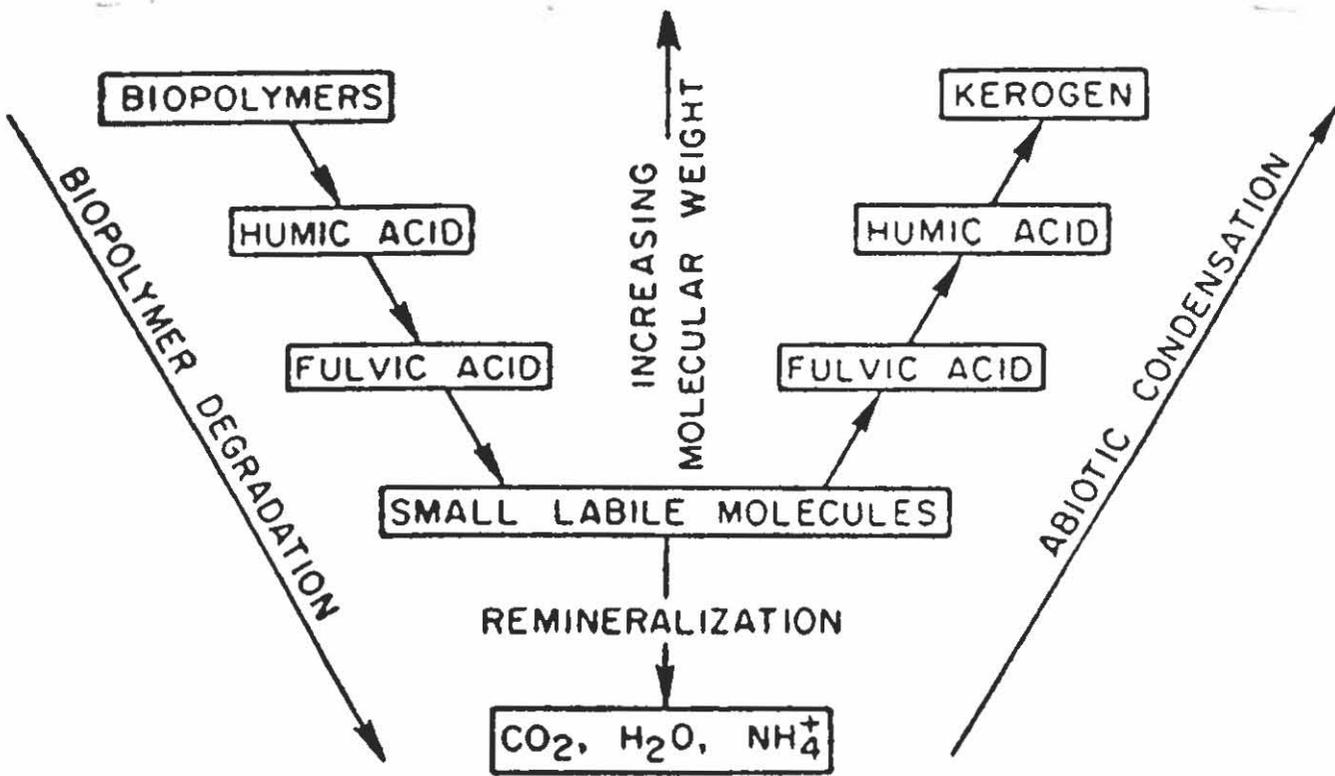
Verificación: La última parte de la separación de ácidos húmicos y fúlvicos consiste en la verificación de los ácidos húmicos y fúlvicos separados. Esto se realiza por comparación con valores promedios y por las propiedades ácidas.

II.2.- Modelos de Formación de la Sustancias Húmicas.

Se han sugerido en la literatura científica una gran variedad de modelos de formación de las SH para explicar las características de las SH de diferentes ambientes naturales.

Dos modelos generales de formación pueden resumir todos los propuestos, atendiendo a si la reacción que es directamente responsable de la formación de las sustancias húmicas, tiene un efecto degradativo (disminuyendo el peso molecular) o agregativo (aumentando el peso molecular). Ambos modelos se encuentra esquematizados en la siguiente gráfica.

El primero de los modelos, que se conoce como degradación de biopolímeros (BD), parte de la base de que la polimerización es un producto del metabolismo secundario de las células, dando lugar a los biopolímeros, los cuales se



encuentran parcialmente degradados, originando las sustancias húmicas. En este modelo, no se destruye completamente la estructura original del biopolímero por acción microbiana (Hatcher y Spiker).

En el segundo de los modelos, aparece la condensación, o "repolimerización" de pequeñas y reactivas moléculas orgánicas generadas por la rotura de enlaces en el biopolímero original. Tal mecanismo, es conocido como condensación abiótica (AC), en el mismo la sustancia precursora al final es formada biológicamente y degradada enzimáticamente. Debido a su construcción, los modelos AC asignan a los ácidos fúlvicos como precursores de los ácidos húmicos, todo lo contrario de lo requerido por los modelos BD.

III.- ACTIVIDAD DE LA MATERIA ORGANICA EN EL SUELO CON ESPECIAL REFERENCIA A LA FUNCION DE LAS SUSTANCIAS HUMICAS

Dada la enorme complejidad de las distintas formas de materia orgánica del suelo, no es siempre posible establecer la fracción que ejerce una determinada función o el grado en que puedan estar implicadas las diferentes fracciones. En este trabajo resaltaremos cuando sea posible el papel específico de las SH, las fracciones orgánicas del suelo más activas desde el punto de vista agronómico y medioambiental.

Los efectos de la SH se deben a la multiplicidad de sus propiedades, no restringidas a un componente específico sino relativas a un sistema con propiedades genéricas atribuibles al total del grupo. Así, en las SH podemos resaltar tres propiedades que no pueden ser atribuidas a una única especie y que indicarán la influencia de un grupo:

- * Contienen estructuras hidrofílicas e hidrofóbicas, y por tanto, pueden ser adsorbidas sobre superficies de muchas partículas, influyendo así en procesos tales como disolución, agregación y crecimiento de cristales.

- * Pueden complejar iones metálicos y pequeñas moléculas orgánicas influyendo en la disponibilidad o induciendo su adsorción y sedimentación con partículas en sistemas acuáticos.

- * Tienen propiedades ácido-base, con un amplio rango de valores de pK, y consecuentemente juegan un importante papel en la regulación del pH del suelo.

III.1.- Influencia sobre las condiciones físicas del suelo:

La materia orgánica del suelo es en gran medida responsable, directa o indirectamente, de que el medio físico sea el adecuado para el crecimiento de las plantas.

El Humus contribuye de forma destacada a la formación de una estructura adecuada y estable, factor importantísimo de la fertilidad de los suelos. En efecto, una buena agregación del suelo influye favorablemente en el balance hídrico de este (infiltración, drenaje, retención de agua), textura, aireación y temperatura, y consecuentemente en una buena actividad microbiana, facilidad de penetración de las raíces

etc., elementos todos ellos decisivos para el buen desarrollo de los cultivos. Naturalmente, una buena agregación es importante para la conservación de la estructura del suelo, que evite los problemas de erosión y desertificación.

Dadas las dificultades de experimentación y la complejidad de los fenómenos que ocurren en el suelo, los conocimientos actuales sobre la formación y estabilización de agregados son todavía fragmentarios e imprecisos. En la formación de agregados están implicados factores tan diversos como el tamaño y tipo de partícula mineral, cambios bruscos de temperatura, microorganismos y mesofauna (lombrices), así como en menor grado, fuerzas químicas y electrostáticas. Todos ellos aseguran la formación de pequeños agregados, antes que agregados de un mayor volumen, menos activos en la formación de una estructura adecuada.

Por otro lado, es de destacar que la propiedad de formar una estructura estable no es igual para todos los tipos de Humus, pudiendo decirse que en este sentido influye más la calidad que la cantidad de materia orgánica. Las mejores condiciones se obtienen con Humus recién formados influyendo:

- a) el tipo de material orgánico que se aporta (abonos

verdes < paja y estiércol)

- b) la naturaleza de la cubierta vegetal
- c) el tipo de cosecha,

sin olvidar tampoco la influencia determinante del clima y el tipo de suelo.

En cuanto a la participación de fracciones individuales del humus, no es obviamente posible exponer aquí las muchas investigaciones que han tratado de relacionar la formación de agregados con componentes individuales del humus. Solamente destacar la participación de los mucopolisacáridos microbianos en la formación de agregados estables.

Las SH por su parte, también participan en esta estabilidad por su interacción con los coloides minerales del suelo.

III.2.- Influencia sobre la planta y demás organismos vivos:

Las posibles interacciones pueden clasificarse en dos categorías distintas.

En primer lugar, las que influyen directamente sobre los

organismos implicados (biota), principalmente con la planta y por extensión con los cultivos y la producción agrícola y afectan reacciones bioquímicas específicas y por tanto tienen que ser evaluadas atendiendo a la estructura molecular.

El segundo tipo son acciones indirectas en las cuales las SH interaccionan por sus propiedades físico-químicas con compuestos que regulan el desarrollo y crecimiento de plantas y proliferación de poblaciones microbianas.

III.2.1.- Efectos directos:

(a) Participación en los ciclos biogeoquímicos:

La relación de las SH es particularmente relevante en el caso de los ciclos biogeoquímicos del carbono y nitrógeno, y en menor medida en el caso del fósforo y azufre.

ciclo del carbono

La materia orgánica suministra el material energético que hace posible la presencia y proliferación de los microorganismos heterótrofos. La materia orgánica de suelos tiene un contenido en carbono de alrededor del 50%, y en

comparación con otros tipos de compuestos biógenos, es relativamente resistente a la degradación microbiana. Mientras que la cantidad de carbono potencialmente disponible para su mineralización por microbios (del orden de 10^{12} Tm) parece alto, la velocidad de degradación es de sólo del orden de 10^9 Tm/año. Debido a que la mayor parte de la biomasa residual está en una forma alterada, no es inmediatamente disponible como fuente de carbono, tampoco pueden sus productos de degradación ser utilizados por la población microbiana o por la planta.

La principal fuente de carbono para los microorganismos del suelo es la de los residuos vegetales y animales de la cual más de 5×10^9 Tm/año son mineralizadas. Están por resolverse dentro de este balance simple una serie de controversias planteadas en el estudio particular de casos puntuales, como por ejemplo en las selvas tropicales donde resulta que hay un balance positivo de oxígeno con respecto a anhídrido carbónico.

ciclo del nitrógeno

La base del ciclo del nitrógeno es la mineralización del nitrógeno orgánico presente en los restos vegetales y la

inmovilización biológica del nitrógeno inorgánico por conversión en compuestos orgánicos en las paredes celulares de los microorganismos.

El nitrógeno como macronutriente tiene una influencia decisiva en el crecimiento y desarrollo de plantas y también se encuentra en las SH del suelo, aunque en cantidades variables. En el equilibrio, la cantidad de nitrógeno nutriente liberado proviene no sólo de los residuos de las plantas ya que también pueden contribuir los microorganismos.

Por otra parte, no puede olvidarse la participación de compuestos orgánicos nitrogenados del tipo de las aminas, aminoácidos, péptidos o heterociclos nitrogenados. La forma de incorporación del nitrógeno, determina su liberación durante la degradación de las SH.

Diferentes mecanismos, tales como complejos de transferencia de carga para la fijación inicial de aminoácidos y heterociclos y enlaces covalentes de tipo amínico, se sabe que participan en los procesos de inmovilización no biológica, es decir reacciones de Maillard entre compuestos nitrogenados y celulósicos para formar melanoidinas.

A la inversa, las reacciones de las sustancias húmicas con compuestos nitrogenados influye negativamente en la disponibilidad del nitrógeno fertilizante para las cosechas. Se ha encontrado que los ácidos húmicos adsorben superficialmente, amoníaco y lo polimeriza formando heterociclos. Esta adsorción de amoníaco por las SH tiene implicaciones prácticas, habida cuenta de la tendencia creciente a aplicar nitrógeno fertilizante como amoníaco líquido.

En suelos orgánicos se observa un bajo rendimiento de los fertilizantes amoniacales. También se ha demostrado que considerables cantidades de urea pueden ser adsorbidas por los ácidos húmicos formando un complejo de adición (interacción de radicales libres y enlaces de hidrógeno) del que resulta un decrecimiento de la capacidad de cambio catiónico (CCC) y un incremento del pH.

El nitrógeno se evapora a la atmósfera como amoníaco (sobre todo en suelos calizos), y eso es una pérdida económica sustancial que solo puede regularse conociendo los factores implicados. En este sentido el humus podría jugar un importante papel.

Ciclos del fósforo y azufre

Del 10 al 80% del total del P del suelo puede estar en forma orgánica, como inositol-fosfatos, fosfolípidos, ácidos nucleicos. Tiene una dinámica similar a la del nitrógeno (mineralización-inmovilización).

Una parte importante del S del suelo está incorporado a la materia orgánica en formas aún no determinadas con absoluta certeza (aminoácidos azufrados, ésteres-sulfatos, sulfatos orgánicos, etc.), existiendo indicios de la adsorción química del sulfato a la materia orgánica. Los procesos de mineralización-inmovilización son similares a los del N y P.

(b) Efectos fisiológicos: hechos y especulaciones.

En relación con la función fisiológica de derivados del Humus, no debemos olvidar que constituye una fuente de sustancias fitotóxicas y fitoreguladoras. Así, algunos ácidos fenólicos producidos por microorganismos o exudados de raíces, son nocivos para algunas plantas superiores y microorganismos, mientras otras, tales como la auxina, ácido B-indol acético (y en general los compuestos de acción

auxínica), formados a veces en cierta cantidad durante la descomposición de residuos orgánicos favorece el crecimiento de plantas superiores.

Una serie de experiencias realizadas en las décadas de los 40 y 50 parecieron confirmar que las SH, sobre todo las fracciones de menor peso molecular, podían ser absorbidas en concentraciones muy bajas por las raíces de las plantas. Siempre se plantea la duda de si estos productos naturales de gran tamaño molecular pueden penetrar en las membranas biológicas. La penetración de las sustancias húmicas en la planta es una condición para la participación en el metabolismo de las plantas. La función o el efecto fisiológico que estas sustancias pudieran ejercer sobre el metabolismo o sobre las reacciones bioquímicas que tienen lugar en los vegetales no han sido aun bien definidas.

Sería prolijo exponer los muchos mecanismos postulados para aclarar todos los efectos observados (rizogénesis, germinación, control del balance hídrico, consumo de nutrientes, actividad de peroxidasa, permeabilidad celular, etc.) pero sólo citaremos las que han sido mejor documentadas:

- * estos compuestos no participan directamente en la formación del material vegetal y su acción es comparable a la de biocatalizadores.
- * actúan como reguladores de los factores de crecimiento cuando están en exceso o son deficientes.
- * influencia en la síntesis de proteínas y ácidos nucleicos
- * influencia en la fosforilación oxidativa, etc.

Todas las influencias químicas de las SH sobre la planta y microorganismos son acciones que afectan al metabolismo y por tanto hay una interacción con las enzimas. Dichas interacciones varían de una planta a otra y pueden ser positivas o negativas bajo diferentes condiciones medioambientales.

La interacción de las SH con las enzimas puede, por tanto resumirse de la siguiente forma:

- 1) Las SH y las enzimas interaccionan directamente. Los mecanismos de unión van desde efectos de adsorción o efectos estéricos a enlaces covalentes (p.e. ácido-amida o enlace éster). Las SH no sólo

son capaces de modificar el centro activo por cambio en las estructuras terciarias o cuaternarias de la proteína de las enzimas, sino que también pueden actuar directamente en los centros activos.

- 2) Las SH comprenden una multitud de estructuras diferentes y no tienen un peso molecular definido. Por tanto algunas sustancias húmicas pueden actuar como sustratos análogos y entorpecer el equilibrio de la reacción enzimática.
- 3) Las propiedades de intercambio iónico de las SH resulta en la fijación de cationes bivalentes, a menudo usados como cofactores en las catálisis enzimáticas o para la estabilización de la estructura en determinadas moléculas de proteína.

Esta última interacción lleva directamente a comentar las influencias indirectas de las sustancias húmicas en el desarrollo de la planta.

III.2.2.- Efectos indirectos:

Los efectos indirectos influyen el crecimiento u otras manifestaciones propias de organismos vivos, no como agente activo sino vía interacciones con otros compuestos químicos. Las SH influyen en los mecanismos de adsorción, complejación, movilización o retención de la práctica totalidad de las especies químicas del suelo.

Este es un tema de indudable actualidad reflejado en numerosísimas publicaciones en las que se trata de modelizar a través de cálculos matemáticos el comportamiento de fracciones individuales o de sistemas húmicos globales.

(a) Interacción con iones metálicos:

- En primer lugar se considera que la contribución de la materia orgánica a la capacidad de cambio catiónico (CCC) del suelo (propiedad que refleja la fertilidad, según muchos autores), es 2-3 veces superior a la de los coloides minerales, en virtud de su carga negativa y elevada area superficial. El complejo adsorbente confiere al suelo una capacidad tampón respecto a cambios en la composición

catiónica de la solución del suelo al tiempo que actúa como reserva de los mismos para la planta cuando esta los necesita. Por otra parte, evita también la pérdida de nutrientes por lixiviado.

- El Humus, mediante reacciones de cambio y mecanismos de quelación influye notablemente en la disponibilidad de microelementos esenciales para la planta. En la materia orgánica del suelo en vías de humificación o descomposición, existen un gran número de sustancias de bajo peso molecular, con grupos funcionales de poder quelatante. Entre estas sustancias se incluyen glucósidos, ácidos fenólicos, azúcares, aminoácidos, y particularmente ácidos alifáticos. La fracción fúlvica, rica en polisacáridos también posee un gran poder quelatante.

Los diversos microelementos son quelatados por estas sustancias quedando en formas movilizables o, en algunos casos ligada en forma no cambiante. En este sentido, la explicación de posibles efectos contradictorios del Humus en la nutrición vegetal puede encontrarse en la relativa estabilidad de los complejos formados entre un metal determinado y un agente quelatante externo o celular.

Los cationes como Fe, Cu, Zn y Mn son micronutrientes para plantas y ciertos microorganismos y presentan una gran influencia en su crecimiento. Algunos de los metales de transición son llevados a las plantas en forma de quelato, especialmente debido a que la solubilidad en la solución del suelo a pH normales no es lo suficientemente alto para un aporte suficiente a varias plantas como p.e. hierro quelatado.

Las SH son buenos agentes quelatantes y pueden transportar hierro en forma de quelato a las raíces de la planta y además estimular la translocación de estos iones dentro de la planta. Desde luego, el diferente comportamiento de las plantas con los complejos sustancias húmicas-metal ha de tenerse en cuenta.

Debido a un mejor aporte de micronutrientes, esta estimulación en el crecimiento es sólo un aspecto parcial de la interacción de los cationes con las sustancias húmicas. Un efecto de inmovilización puede ser causado por la cantidad significativa de materia orgánica que está ligada a constituyentes particulares del suelo, como óxidos, arcillas, etc. Sin embargo, hay suficientes grupos funcionales que pueden ligar cationes mediante la formación de quelatos. Los

cationes ligados son, por tanto, fijados a través de este mecanismo vía sustancias húmicas a la matriz del suelo. Esto puede causar un aporte insuficiente a las plantas.

La precipitación en forma de compuestos insolubles es otra reacción posible de los cationes con las sustancias húmicas que ha de ser considerado. Un cierto número de metales pesados tóxicos (Cd, Pb, Hg, Ba), forman complejos insolubles con la fracción soluble en agua de las sustancias húmicas. Los complejos así formados no están disponibles, por las plantas y microorganismos; consecuentemente, la concentración de los cationes tóxicos en la solución del suelo se reduce.

Este último efecto nos lleva al último de los efectos indirectos de las sustancias húmicas en los organismos vivos.

(b) Interacción con xenobióticos orgánicos:

Cada vez son más los productos orgánicos que se introducen en el medio ambiente agrario, tales como productos agroquímicos o polutantes de diverso origen. De acuerdo con el tipo de compuesto, varias partes de las SH se verán envueltas.

Las sustancias catiónicas reaccionarán con las sustancias húmicas mostrando una alta carga aniónica, por interacción electrostática.

Los compuestos no polares reaccionarán con partes de las sustancias húmicas menos cargadas, ácidos húmicos o incluso huminas. Los mecanismos de unión van desde las fuerzas de Van der Waals a los enlaces covalentes.

La fijación por las SH de compuestos tóxicos presentes en el medioambiente actúa positivamente en plantas y microorganismos debido a la disminución de la disponibilidad de los compuestos fijados. La disminución de la concentración de estas sustancias en la solución del suelo depende de la cantidad de sustancias húmicas presentes.

Los herbicidas introducidos en el medio ambiente por las prácticas agrícolas están sujetos a complejos procesos biológicos y no-biológicos. La actividad microbiana ha sido considerada generalmente como el factor primario que gobierna el destino de los herbicidas en suelos, pero estudios recientes indican que diversos mecanismos no-biológicos, que implican interacciones con los coloides del suelos (arcillas y sustancias húmicas) pueden jugar un papel más importante

que el sospechado.

En particular los compuestos húmicos, ampliamente distribuidos en sistemas naturales, pueden interaccionar con herbicidas mediante diversos mecanismos entre los que destacan:

a) Inactivación por adsorción a través de enlaces físicos y/o químicos:

Los mecanismos de interacción implican normalmente fuerzas de Van der Waals y puentes de hidrógeno, junto con enlaces iónicos y complejación a través de metales iónicos polivalentes. La presencia de complejos de transferencia de carga entre algunos herbicidas y ácidos húmicos se ha demostrado mediante estudios por IR, mientras que la posible formación de enlaces covalentes, la llamada quimiosorción, también ha sido sugerida.

b) Degradación y detoxificación por reacciones químicas:

La reconocida presencia de especies radicales libres altamente reactivas en las SH ha llevado a la hipótesis de que estos radicales libres pueden participar también activamente en los procesos de

interacción con herbicidas. Se ha demostrado que sistemas no-biológicos de radicales libres pueden degradar "in vitro" diversos herbicidas, los cuales son convertidos en los mismos metabolitos de degradación microbiana.

c) Foto-descomposición:

La foto-descomposición, y la fotooxidación en particular, están entre las reacciones mayormente distribuidas en el medio ambiente que los pesticidas pueden sufrir en solución acuosa o en suspensión, cuando se activan con los fotosensibilizadores biológicos adecuados, como la riboflavina. Por otra parte, la lignina, un precursor bien conocido del humus del suelo, se ha mostrado que actúa como un fotosensibilizador por un mecanismo de radicales libres, y el ácido húmico por sí, es de esperar que actúe en el mismo sentido.

Existen fuertes evidencias que indican que los pesticidas o los residuos procedentes de su descomposición pueden formar enlaces químicos estables con los componentes de la materia orgánica del suelo, y que tales enlaces

incrementan considerablemente su persistencia en el medio ambiente.

Hay dos mecanismos principales: una combinación química directa de los pesticidas con los centros activos de las superficies colidales orgánicas o una incorporación a la estructura de las SH durante el propio proceso de humificación.

IV.- ENMIENDAS Y FERTILIZANTES ORGANICOS. CASO DE LOS HUMATOS COMERCIALES

Muchos de los conocimientos básicos sobre las fracciones orgánicas del suelo encuentran una aplicación práctica en la evaluación correcta de fertilizantes orgánicos y en la optimización de los procesos controlados de compostaje.

La aplicación de enmiendas orgánicas como medida para mantener e incrementar la fertilidad del suelo es una práctica ancestral. Esta tradición ha sido de alguna manera postergada debido a la introducción de los fertilizantes minerales a bajo costo.

Actualmente hay un renovado interés en el uso apropiado y efectivo de residuos orgánicos, composts y otros aditivos orgánicos debido a un conjunto de intereses económicos y ambientales bien conocidos. Así, la utilización de compost procedentes de reciclajes de residuos sólidos urbanos, lodos de estaciones de depuradoras de aguas residuales, o residuos industriales de transformación de productos agrícolas (vinazas, alpechines), como enmiendas orgánicas, es una práctica común ampliamente aceptada en nuestros días. Sus beneficiosos efectos están sin embargo limitados por

potenciales riesgos de contaminación por metales pesados o compuestos orgánicos nocivos.

Otro problema añadido es la información inconsistente sobre su rendimiento y actuación, por lo que es necesario investigar con rigor, en cada caso particular, la conveniencia de su aporte y el seguimiento de sus efectos.

Así, en el caso de los humatos comerciales, se ha venido especulando que tienen los mismos efectos beneficiosos sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo que el humus nativo. Los humatos comerciales proceden principalmente de lignitos oxidados, o productos derivados de éstos, y han sido usados como enmiendas orgánicas del suelo desde hace varias décadas.

La característica principal de los lignitos oxidados es su contenido, inusualmente alto, en ácidos húmicos, del orden del 30 al 90%. El material de por sí no contiene cantidades significantes de N,P,K, pero se asume que tienen un efecto favorable en las propiedades del suelo.

Las diversas casas comerciales a menudo dan una impresión de que los humatos procedentes de lignitos oxidados

tienen propiedades biológicas y químicas similares a la del humus del suelo, pero, este no parece ser el caso.

El humus del suelo consiste en un amplio abanico de sustancias desde compuestos biógenos (grasas, carbohidratos y proteínas) a ácidos húmicos y fúlvicos.

Los humatos de carbón pueden considerarse una etapa más avanzada de la transformación del humus en formas fósiles. Los principales cambios incluyen pérdidas de carbohidratos, proteínas y otros constituyentes, y un incremento en el estado de oxidación del material húmico. Así, a diferencia del humus del suelo, los humatos del carbón están prácticamente libres de estos compuestos biológicamente importantes como las proteínas o los polisacáridos.

También se ha comprobado que los ácidos húmicos de lignito no son iguales a los ácidos húmicos del suelo; tienen un mayor contenido en carbono pero menor contenido en oxígeno, y presentan estructuras químicas más condensadas. Debido a que los humatos del carbón sólo tienen un parecido superficial al humus del suelo, no debe esperarse que actúen de la misma forma o tener las mismas propiedades.

También, y debido a su alto contenido en carbono y estructuras condensadas, los ácidos húmicos de lignito serán fácilmente inmovilizados en el suelo, incluso aplicados en forma soluble.

La ausencia de proteínas y otros compuestos nitrogenados indica que los humatos comerciales "per se" no son una fuente apropiada de nitrógeno para las plantas.

Los mucopolisacáridos, los constituyentes del humus del suelo más efectivos en formar agregados estables, están ausentes en los humatos comerciales por lo que estos serían relativamente ineficaces como condicionadores del suelo.

Los humatos comerciales "per se" son inertes debido a su asociación con la materia mineral. Por tanto es de esperar que en las dosis en que habitualmente se recomienda su uso, tengan poco, si alguno, efecto directo sobre las propiedades físicas del suelo.

V.- CONCLUSIONES

En resumen, como resultado de un conjunto de acciones favorables, el Humus es un factor esencial para elevar la capacidad de producción del suelo y por tanto, la agricultura moderna debe plantearse el desarrollo de practicas de laboreo realistas que permitan conservar esta fuente natural de nutrientes.

Sólo el conocimiento de la estructura y funcionamiento de los sistemas naturales puede garantizar la conservación y uso racional de los mismos. Las SH son un eslabón importante a la hora de analizar la estabilidad o vulnerabilidad de un sistema natural y evaluar el impacto real de factores diversos sobre el equilibrio ecológico global.

De los estudios agrobiológicos realizados hasta ahora en España, se infiere que los suelos de cultivo españoles son en su mayor parte pobres o muy pobres en materia orgánica y esta situación se agrava cuantitativamente por el problema de la progresiva desertización de las tierras de cultivo, fenómeno que afecta profundamente a nuestra agricultura, como ha sido señalado en las últimas conferencias de las Naciones Unidas sobre desertización (Nairobi, Estocolmo, Rio de Janeiro), una

de cuyas causas fundamentales es precisamente el agotamiento en materia orgánica del suelo.

No cabe, pues duda de que el suministro de materia orgánica y/o su conservación es una cuestión crítica en lo que se ha venido en llamar la Agricultura sostenible o en aquellas zonas donde los efectos de la erosión son devastadores.

Objetivo específico dentro de la política de Medio Ambiente en España es la recuperación de zonas degradadas y suelos contaminados. El desarrollo de técnicas de detección, evaluación y regeneración ambiental debe contemplar la participación activa o pasiva del Humus, ante la creciente expansión de los fenómenos de erosión y desertificación del suelo, con particular sensibilidad al problema de la pérdida de cubierta vegetal, de la que tanto depende su capacidad de uso de otros recursos ambientales como el agua.

La elucidación de muchos e importantes procesos agrícolas en los que intervienen las SH, tales como la formación de complejos organo-minerales y la interacción con xenobióticos, así como los efectos fisiológicos asociados a la misma, pasa por un mejor conocimiento de la naturaleza

química estructural de las fracciones húmicas a nivel molecular.

La estructura molecular definitiva de las SH y consecuentemente la exacta naturaleza de sus funciones no se conocen aun completamente, y constituye por tanto uno de los campos de investigación más estimulantes e intrincados en el campo de los recursos naturales.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

Aiken, G.R. (1985) Isolation and concentration techniques for aquatic humic substances. In: Humic substances in Soil, Sediment and Water, Eds. G.R. Aiken y col. New York: Wiley-Interscience.

Y. Chen y Y. Avnimalech (1986) The Role of the Organic Matter in Modern Agriculture, Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, pp. 306.

F.H. Frimmel y R.F. Christman (1988) Humic Substances and their Role in the Environment, John Wiley & Sons, Chichester, pp. 270.

P.G. Hatcher and E.C. Spiker (1988) Selective Degradation of Plant Biomolecules In: Humic Substances and their Role in the Environment, John Wiley & Sons, Chichester, pp. 270.

P. MacCarthy, C.E. Clapp, R.L. Malcolm y P.R. Bloom (1990) Humic Substances in Soil and Crop Sciences: Selected Readings, American Society of Agronomy, Maadison, Wisconsin, pp. 281.

F.J. Stevenson (1982) Humus Chemistry. Genesis, Composition, Reactions, John Wiley & Sons, New York, pp. 443.

E.A. Paul y A.D McLaren (1975) Soil Biochemistry. Vol.4, Marcel Dekker, Inc., New York, pp. 277.

R.F. Christman y E.T. Gjessing (1983) Aquatic and Terrestrial Humic Materials, Ann Arbor Science, Ann Arbor, Michigan, pp. 538.

B.L. Sawhney y K. Brown (1989) Reactions and Movemnet of Organic Chemicals in Soils, Soil Science Society of America, Inc., Madison, Wisconsin, pp. 474.