

Felipe Macías

Recuperación de suelos degradados, reutilización de residuos y secuestro de carbono. Una alternativa integral de mejora de la calidad ambiental

Recibido: 4 Septiembre 2004/ Aceptado: 16 Octubre 2004
© IBADER- Universidade de Santiago de Compostela 2004

La Estrategia de Protección del Suelo. Funciones, amenazas y objetivos de actuación

Diferentes problemas ambientales han llevado al establecimiento por parte de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo (Río de Janeiro, 1992) al concepto del “desarrollo sostenible” y a la necesidad de utilización racional de los recursos por las sociedades actuales de modo que se alcancen los objetivos de crecimiento deseados sin pérdida del patrimonio que deben recibir las generaciones futuras. En el caso de la Unión Europea esto ha llevado al desarrollo de diferentes acciones o estrategias sobre los principales recursos, teniendo especial importancia los que se refieren a la Estrategia Europea de Protección del Suelo. En este nuevo contexto (fuertemente impulsado durante la Presidencia Española de la Unión Europea con la presentación en Soria del documento inicial de la Estrategia en abril de 2002, y el inicio de los trabajos que han concluido con la presentación de las conclusiones de los mismos en Bruselas en mayo de 2004), el suelo es considerado como un recurso fundamental, que junto con el Agua, el Aire y la Biota, constituyen los 4 pilares o recursos ambientales básicos que deben ser protegidos y preservados por sistemas legislativos y normas de actuación adecuados.

La Estrategia de Protección del Suelo recoge sus principales funciones (Tabla 1) y amenazas (Tabla 2), así como la importancia que tiene en todas las Políticas

Ambientales y las características específicas que presenta su gestión.

Como principales funciones del suelo se reconocen junto a las ideas utilitarias como “*productor de materias primas, alimentos y fibras*” o la de “*sistema físico que soporta las principales actividades humanas*” otras que aluden al papel clave del suelo en el mantenimiento de la calidad ambiental, como protector de los otros sistemas más sensibles y de menor capacidad de amortiguación frente a las modificaciones ambientales. La capacidad del suelo para filtrar, retener y transformar sustancias, amortiguando los impactos y regulando la movilidad y biodisponibilidad de diferentes elementos y sustancias es reconocida junto a la importancia que tiene como “*medio de vida y reserva genética*” siendo considerado como el hábitat que contiene la mayor diversidad genética y la menos conocida, siendo su actividad extraordinariamente importante en multitud de aspectos que afectan a nuestro desarrollo.

Como principales amenazas que afectan a los suelos de Europa se han identificado ocho: Erosión, Pérdida de materia orgánica, Contaminación, Sellado u ocupación destructiva, Compactación, Reducción de la biodiversidad, Salinización, Inundaciones y Deslizamientos de Tierras, poniéndose de manifiesto que son los procesos de contaminación y degradación de suelos los que tienen una mayor relevancia tanto por los daños directos como por los indirectos que produce el descenso de la eficacia de las funciones del suelo. Por ello, aunque ya en el Sexto Programa de Acción en Materia de Medio Ambiente 2001-2010 se hacía especial mención de la necesidad de establecer mecanismos de Protección del Suelo contra la Erosión y la Contaminación, la Estrategia insiste en ello, reconociendo cinco grupos o temas de trabajo centrados en la Erosión, Contaminación y Pérdida de Materia Orgánica, así como en la necesidad de incrementar la Investigación, Vigilancia y Control de la Calidad de los Suelos (Monitorización). Estos 5 grupos temáticos han funcionado durante toda la elaboración de la Estrategia Europea de Protección del Suelo presentando conclusiones específicas para cada uno de ellos y un gran número de documentos

Principales funciones del suelo, según el documento “Hacia una estrategia temática para la protección del Suelo”.

La producción de alimentos y biomasa.
 La Capacidad de almacenamiento, filtración y transformación.
 El funcionamiento del suelo como un medio de vida y una importante reserva genética.
 El funcionamiento del suelo como el sustrato básico en el que se han realizado la mayor parte de las actividades humanas a lo largo del tiempo, con lo que se convierte tanto en un elemento de paisaje como en un archivo de la historia cultural.
 El suministro de materiales recursos para la humanidad.

Tabla 1.- Principales funciones del Suelo.

internos. Recuperar suelos degradados o contaminados restableciendo sus principales funciones y protegiendo a los suelos de sus amenazas es la base de las políticas de actuación elaboradas por la Estrategia de Protección del Suelo que, lógicamente, deben interactuar con otras políticas ambientales y, en especial, con las de Gestión de Residuos a través de suelos, la Protección de las aguas superficiales y subterráneas y las políticas de incentivación del secuestro de carbono en biomasa y suelos, entre otras.

En el caso de España la recuperación de suelos tiene una importancia extraordinaria por la gran extensión de suelos que han perdido una parte significativa de su “calidad” por procesos degradativos que influyen negativamente en el cumplimiento de sus funciones. Entre los más importantes pueden señalarse los siguientes:

- *Desertificación.*- Una gran parte del sureste de España (provincias de Almería, Murcia, Granada, Alicante y pequeñas extensiones de otras, se encuentra sometido, por la interacción de causas climáticas con malos usos antrópicos, a intensos procesos de desertificación, con pérdida de los horizontes superficiales y drástica disminución del contenido de materia orgánica de los suelos a valores inferiores al 1%. Estos procesos tienen como principal consecuencia la pérdida de estructura y fertilidad, la disminución de la actividad biológica y la progresiva desaparición de la vegetación arbolada y de las posibilidades de cultivo, debiendo regenerarse mediante la reintroducción de una cobertura vegetal estable y autosostenible que permita alcanzar un nuevo equilibrio en el que se proteja el suelo contra la degradación.

- *Erosión.* En amplias zonas de la Península Ibérica, con régimen mediterráneo de carácter xérico o árido, la erosión es un proceso frecuente, muchas veces favorecido por el sobrepastoreo o las técnicas de cultivo y gestión del agua utilizadas. Amplias zonas de Castilla, Asturias o Cantabria, presentan en superficie roquedos prácticamente

sin cobertura edáfica. Estos karst, lapiales, torcales, páramos, etc., pueden ser revegetados favoreciendo la formación de suelos a pesar de las dificultades que imponen las limitaciones climáticas. Sin embargo, este proceso se ha extendido incluso a las zonas con precipitaciones abundantes que deberían encontrarse en condiciones de biostaxia, como en Galicia, Sistemas Central e Ibérico o amplias zonas de los Pirineos. La acción del fuego es, en muchos casos, la que inicia el proceso erosivo aumentando progresivamente la superficie ocupada por “suelos lépticos”, que, por su bajo espesor, son escasamente productivos y muy sensibles a todo tipo de impactos o modificaciones físico-químicas.

- *Contaminación de Suelos.* La contaminación de suelos es un proceso importante causado en España por diferentes procesos pudiendo destacarse las actividades industriales y las actividades extractivas tales como la minería, la creación de infraestructuras y la agricultura. Zonas de industrialización antigua, y muchas veces en declive, como el País Vasco, Asturias o el entorno de Barcelona presentan suelos contaminados por diferentes subproductos industriales y urbanos. También existen otras zonas puntuales en el resto de de España generalmente asociadas a enclaves dedicados a la industria química (caso de Huelva, Valencia, entre otras).que tienen el mismo problema siendo los principales contaminantes los metales pesados, hidrocarburos y derivados y los agentes acidificantes fuertes. Las actividades mineras se remontan al menos a unos 4.000 años, con importantes explotaciones en las que han quedado suelos contaminados que deben ser restaurados. Es el caso de la faja pirítica andaluza, que se extiende por el sur de Portugal, Huelva y Sevilla, con gran número de minas abandonadas con problemas de acidificación causada por la oxidación de sulfuros y con elevados contenidos de As, Cu, Pb, Zn y, a veces, Hg, derivado de procesos de amalgamación para la recuperación de metales preciosos. Otras zonas mineras

Principales amenazas del suelo, según el documento “Hacia una estrategia temática para la protección del Suelo”.

Erosión.
 Pérdida de materia orgánica.
 Contaminación del Suelo.
 Sellado u ocupación destructiva.
 Compactación.
 Reducción de la biodiversidad.
 Salinización.
 Inundaciones y deslizamientos de tierras.

Tabla 2.- Principales amenazas de los suelos europeos.

importantes son las de la minería de carbón (Asturias, León, Galicia, Teruel,..) también con problemas de acidificación, ausencia de materia orgánica y fertilidad; las canteras de rocas industriales, explotaciones de arcillas En el caso de la Agricultura, especialmente en sus formas más intensivas, se han causado importantes procesos de contaminación de suelos en algunas áreas de las provincias de Valencia (entorno de la albufera), Murcia, Almería, etc., causados por pesticidas, exceso de nitratos y fosfatos, etc., que, en los últimos años se han extendido a prácticamente todas las zonas incrementando los riesgos de eutrofización y descenso de la potabilidad de las aguas. El incremento de la erosión ha sido también una consecuencia de la utilización de técnicas agrícolas o silvícolas inadecuadas al tipo de suelo y/o condiciones climáticas. Finalmente, las obras de construcción de carreteras, infraestructuras viarias e hídricas, parques eólicos, etc., eliminan en la mayor parte de los casos la cobertura edáfica que debe ser restaurada a partir de los materiales residuales o de diferentes materiales de préstamo cuando hay un déficit de material edáfico.

La recuperación de estos y otros suelos degradados o contaminados exige la utilización de medidas y actuaciones especiales que pueden ser extraordinariamente costosas y que incluso pueden causar afecciones, como es el caso de la eliminación de los horizontes superficiales de suelos ("tierra vegetal") de sus lugares naturales para ser utilizada en labores de restauración ambiental como el sellado de vertederos. Sin duda la utilización de materiales de préstamo edáficos es la solución más adecuada para la rápida corrección de muchos problemas y la pronta regeneración de la actividad biológica pero, en lo posible, las labores de recuperación deben realizarse con recursos como el capaceo de los materiales edáficos sólo cuando estos van a ser eliminados o perturbados por otras actuaciones y, en su defecto, deben ser sustituidos por otros materiales residuales que permitan corregir la contaminación y reconstruir un sistema edáfico adecuado.

Gestión de residuos a través de suelos. Suelos derivados de residuos

Desde que existen suelos en la Tierra una de sus principales funciones ha sido la del reciclaje de los restos orgánicos incorporando una pequeña parte de ellos en el conjunto de las moléculas que constituyen el humus y descomponiendo el resto hasta formas elementales que son liberadas a la atmósfera o eliminadas en forma disuelta en las aguas de drenaje participando el suelo, de esta forma, en los ciclos de los principales elementos biogénicos (C, N, P y S). La capacidad para transformar las sustancias orgánicas está relacionada con factores muy diversos pero, en último término, todas las moléculas orgánicas son inestables en las condiciones existentes en los suelos y otros sistemas superficiales debido a que han sido formadas a partir de procesos y condiciones de fuerte reducción (fotosíntesis: $E_h: <-600$ mvol) por lo que, en presencia de agentes oxidantes, tienden a reaccionar y transformarse en compuestos estables y en equilibrio con las condiciones del suelo mediante reacciones oxidativas. Además, estas reacciones oxidativas pueden ser

catalizadas por la actuación de microorganismos (en su mayor parte localizados en los suelos) que obtienen la energía necesaria para sus funciones vitales a través de las transformaciones metabólicas de las sustancias orgánicas. Inestabilidad termodinámica, presencia de oxidantes (O_2 , NO_3 , $Fe(OH)_3$, SO_4^{2-} , ...) y catalisis metabólica son los factores que explican la rápida descomposición de las sustancias orgánicas en los suelos.

La adición antrópica de restos orgánicos al suelo era una consecuencia natural y lógica puesto que en el curso de sus transformaciones se producían resultados positivos. Por una parte, la propia eliminación de residuos y, sobre todo, por la mejora que se observaba en las condiciones físicas (estructurales) del suelo y en el incremento de la disponibilidad de nutrientes para la biomasa del suelo y, en especial, para las plantas cultivadas. De esta forma, todas las culturas antiguas basaron el mantenimiento de la fertilidad de los suelos cultivados en los aportes periódicos de sustancias orgánicas procedentes de diferentes orígenes: restos forestales, excrementos, cadáveres, residuos de cosechas más o menos transformados, etc., que venían a compensar las pérdidas de fertilidad y contenido de carbono del suelo que se producía a consecuencia del laboreo y la cosecha sin que, normalmente, se produjesen problemas en la estabilidad del sistema por exceso de aportes, debido tanto a la calidad de los productos añadidos como a su baja disponibilidad.

Los problemas aparecieron cuando se modificaron tanto la cantidad de los aportes (en la Estrategia europea se considera que, en los próximos años, se producirán más de 1000 millones de Tm de materia orgánica exógena) como su naturaleza y, sobre todo, se alteró el objetivo prioritario de la adición de restos orgánicos a los suelos priorizando la función de eliminación de residuos, generados y no deseados en otros lugares, sobre la de incremento de la fertilidad para las cosechas. La adición de grandes cantidades de restos agrícolas, ganaderos, industriales o urbanos aporta elementos nutritivos e influye, en muchas ocasiones, en la mejora de las propiedades físicas del suelo pero suelen ir acompañados de sustancias indeseables que pueden hacer disminuir, más o menos rápidamente, la calidad del suelo e incluso pueden llegar a causarle graves problemas de contaminación convirtiendo al suelo de sumidero en fuente de contaminantes. Un ejemplo entre muchos es el caso de los suelos del entorno de Chicago en los que, aunque se frenase totalmente el aporte de residuos, la cantidad de PCBs almacenada es suficiente para que se continúe la emisión de estos compuestos en formas volátiles durante los próximos 50 años. (Standley & Hites, 1991).

Ante este cambio de la situación se han realizado propuestas de modificación de los tipos de gestión de los residuos, en general, y de los orgánicos, en particular, en el sentido de minimizar e incluso eliminar totalmente los aportes de residuos a los suelos como una medida de prevención del mantenimiento de la calidad de estos sistemas que, por medio de sus funciones depuradoras, están protegiendo y garantizando la calidad de los sistemas hídricos, atmosféricos y bióticos superficiales mucho más sensibles (Davies, 1991). Sin embargo, por otra parte,

Residuo	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4	Mezcla 5
% Arena	30	40	25	20	20
% Residuos demolición	20	20	20	25	20
Lodos Serrines graníticos	10	10	15	15	10
Lodos EDAR	10	5	5	10	10
Biomasa Vegetal	25	20	30	25	25
Cenizas	5	5	5	5	5

Tabla 3.- Algunas mezclas de residuos ensayadas con buenos rendimientos.

también existen suficientes argumentos para seguir utilizando los suelos como receptores de residuos por ser el procedimiento de eliminación más económico en la mayoría de los casos y por los beneficios indirectos que se pueden causar al suelo (incremento de nutrientes y actividad biológica, mejora estructural,...), a la atmósfera (fijación de C) y, en general, a toda la biosfera por modular el reciclaje de los elementos a través del suelo que es el sistema superficial que permite un mayor control de la movilidad y biodisponibilidad de los elementos. Así, lo afirma entre otros Mustin (1987) cuando señala que la degradación de la materia orgánica es el fenómeno fundamental que asegura el reciclaje de los elementos constitutivos de la materia viva.

En el debate sobre la utilización del suelo como sistema de gestión de residuos intervienen muchos factores socioeconómicos, naturales (incluyendo el tipo de suelo) y tecnológicos, variables espacial y temporalmente, por lo que la respuesta no podrá ser en ningún caso homogénea, siendo necesario analizar todos los elementos que pueden influir en la toma de decisiones, tales como la necesidad de fertilizantes, correctores y aportes de materia orgánica de muchos suelos, los beneficios ambientales producidos por unidad de coste y, por supuesto, los riesgos de contaminación de los suelos que pueden producirse. Obviamente, son los suelos más degradados o contaminados y los espacios sin o con escaso suelo los que ofrecen mayores perspectivas de mejora y eficacia de las actuaciones de corrección basadas en la utilización de residuos realizando así una doble e importante función ambiental: la recuperación de suelos y la gestión de residuos. En esta línea la formación de suelos derivados de residuos (materiales gárbicos, úrbicos, espólicos,...) es una importante alternativa que ha demostrado su eficacia cuando se conocen adecuadamente tanto las condiciones del medio inicial como las características de los materiales residuales utilizados y su evolución en el tiempo. Conchas de mejillón, lodos de depuradora, cenizas de combustión de biomasa, residuos silvícolas, ganaderos y agroalimentarios, serrines de rocas ornamentales, residuos de demolición, estériles de explotaciones mineras, etc., pueden ser adecuadamente gestionados construyendo a partir de ellos mezclas, más o menos complejas (Tabla 3), que pueden corregir procesos contaminantes por medio de sus características ácido-base, su poder reductor o

complejante, sus propiedades de adsorción superficial o su capacidad de retención de agua, entre otras muchas propiedades, al tiempo que originan un medio adecuado para el desarrollo de la actividad biológica que conduce a la formación de un nuevo suelo, y de sus principales funciones en el ambiente, de forma mucho más rápida que los procesos naturales. Ejemplos como la recuperación de las escombreras de la mina Puentes, el Páramo de Masa (en Burgos), explotaciones mineras en la faja pirítica andaluza, la recuperación de la cuenca del Guadiamar o los ensayos realizados en las minas de A Barquiña y Touro han demostrado que estos materiales, adecuadamente gestionados, no sólo encuentran un destino de reciclaje relativamente económico sino que causan importantes beneficios ambientales y productivos a corto, medio y largo plazo. En todo caso, es necesario insistir en la necesidad de una utilización controlada y vigilada de materiales bien caracterizados en sistemas superficiales bien conocidos y estudiados previamente.

Secuestro de Carbono en suelos y biomasa

De acuerdo con un gran número de autores (Robert, 1996) se ha producido un descenso importante en el contenido de materia orgánica de los suelos que se agravará si las condiciones de temperatura previstas en los modelos de cambio climático por efecto invernadero tienen lugar. El descenso del contenido de materia orgánica de los suelos de las praderas de EEUU puestos en cultivo hace aproximadamente un siglo se estima en un 50%. En Europa la Agencia Europea de Medio Ambiente (1998) estima que unos 115 millones de ha están sufriendo erosión por agua y otras 42 por aire, siendo el problema especialmente grave en el área mediterránea donde procesos de degradación de suelos por desertificación y salinización ya son lamentablemente frecuentes. La pérdida de materia orgánica del suelo uno de los principales factores desencadenantes de estos procesos e incluso en las zonas húmedas de Europa la pérdida de Carbono es importante. Así el informe anterior señala que en Inglaterra y Gales el porcentaje de suelos cultivados con contenidos de Carbono superiores al 4% ha descendido significativamente (más del 50%) en los últimos 15 años mientras que ha aumentado el porcentaje de los suelos con valores inferiores al 2%.

Litología	Sistemas forestales		Suelos cultivados	
	Intervalo	Media	Intervalo	Media
Granitos	2.5-13.9	7.0	0.5-15.5	4.9
Pizarras	3.3-10.2	7.0	0.5-15.8	4.8
Esquistos	1.0-13.3	6.0	0.1-11.2	3.7
Gabros	3.9-19.6	9.7	3.3-13.1	7.7
Anfibolitas	2.3-13.3	7.7	1.3-14.3	4.7

Tabla 4.- Cambios en los contenidos de materia orgánica en suelos forestales (arbolados y monte bajo) en suelos de Galicia (Calvo de Anta et al., 1992).

En Galicia, a pesar de la elevada pluviometría, se ha visto que los suelos cultivados presentan un descenso del orden del 30 al 40% (Macías y Calvo de Anta, 2000) señalando que además de la extracción de biomasa influyen en este cambio la elevación del pH por los aportes fertilizantes y enmendantes y el incremento de la disponibilidad de N, factores ambos que incrementan la actividad biológica y, por lo tanto, los procesos de mineralización de la materia orgánica. Algunos suelos cultivados presentan ya valores inferiores al 1% que se considera como un valor bajo para la conservación de la calidad del suelo (Tabla 4).

Por otra parte, además de los suelos cultivados también existen grandes carencias de C en suelos que han sufrido procesos de degradación por erosión, incendios repetidos o destrucción de los horizontes superficiales por actividades mineras, construcción de infraestructuras, suelos contaminados, etc. En estos casos la adición de materia orgánica es una acción obligada si se quiere reconstruir lo más rápidamente posible la actividad biológica y la capacidad productiva de los suelos degradados siendo estas adiciones una de las claves de la recuperación tanto por vías exclusivas de biorremediación como cuando se recurre a técnicas de recuperación físico-químicas que, en todo caso, deben incluir también la mejora de los nutrientes necesarios para la actividad vital de los microorganismos del suelo si se quiere recuperar el funcionamiento de los ciclos biogeoquímicos.

En síntesis, los descensos del contenido de materia orgánica y la presencia de muchos suelos con bajos contenidos (< 1% de C) obligan a añadir compuestos orgánicos a los suelos para mantener las propiedades físicas del suelo y su actividad biológica, lo que se hace especialmente importante en zonas con climas xéricos o áridos, en áreas de suelos pobres en nutrientes, de baja capacidad de cambio y de retención de agua, en suelos ácidos con arcillas 2:1 y altos niveles de Al cambiante y en suelos contaminados ya que la materia orgánica es un poderoso agente de retención e inmovilización de un gran número de contaminantes orgánicos e inorgánicos.

Además de las funciones protectoras y mejoradoras del sistema edáfico de la materia orgánica ya es ampliamente conocida la preocupación existente en diferentes organismos nacionales e internacionales por el incremento de la concentración de CO₂ atmosférico y las consecuencias previstas por el Panel Internacional sobre el Cambio

Climático (IPCC) sobre el clima. El acuerdo de Kioto incluye entre los sumideros de Carbono que deben tenerse en cuenta el incremento de biomasa producida en los sistemas forestales y los incrementos de secuestro en biomasa y suelos producidos por actividades específicas de gestión en suelos agrícolas, praderas y, sobre todo, en sistemas edáficos en recuperación ambiental por ser en estos lugares donde se puede producir una mayor intensidad de la fijación. Así, cifras obtenidas en Galicia permiten establecer ritmos de secuestro del orden de 20 tC/ha/año en algunos de estos lugares que, parece que pueden mantenerse durante unos 20 a 50 años hasta alcanzar o acercarse a las condiciones de equilibrio. Este plazo de 30 a 50 años en los que los suelos y la biomasa pueden ejercer una importante función de secuestro de C, si se realizan las actuaciones adecuadas, puede ser de extraordinaria importancia para limitar o mitigar los efectos negativos que causaría una brusca disminución de los sistemas industriales y energéticos, actualmente utilizados por lo que parece lógico incentivar el conocimiento de la potencialidad real de estos sumideros.

En USA se han realizado diferentes estudios sobre la capacidad de fijación de carbono en diferentes sistemas edáficos y de las posibilidades tecnológicas de potenciarla y mitigar el efecto invernadero (Lal et al., 1999; Follet et al., 2000;...). En sistemas de cultivo la capacidad potencial de secuestro de Carbono oscila, según Lal et al., (1999), entre 75 y 208.10⁹ kgC/año incluyendo 7% de conversión de suelos a sistemas más tamponizados, 13% producidos por la recuperación de suelos degradados, 49% debidos a las mejoras en las técnicas de conservación de suelos y manejo de residuos, 6% debido a la gestión de la irrigación y 25% debido a la adopción de sistemas de cosecha más eficientes, todo lo cual representa entre el 7.3 y el 8.5% de las emisiones totales de USA y de 1.03 a 1.16 veces las emisiones totales de las actividades agrícolas. Valores para otros sistemas productivos como las praderas, sistemas forestales, etc., se han obtenido o están en vías de obtención.

En Galicia (Macías 1999), se han realizado diversos estudios sobre el contenido de C en los diferentes tipos y usos del suelo a partir de los cuales puede determinarse el potencial de fijación en las condiciones naturales y, posteriormente, de acuerdo a estudios similares a los de USA el incremento potencial esperable con la corrección de

Tipo de suelo	Contenido total de Carbono	
Histosoles fibricos y sápricos	900-1300 t/ha	5.0-5.6 t/ha/cm
Umbrisoles de fase cumúlrica ricos en Al activo	700-950	5.0-7.7
Andosoles de fase cumúlrica	350-550	5.0-7.8
Suelos ándicos	150-250	4.5-5.2
Umbrisoles de fase somera	100-250	4.0-6.0
Umbrisoles háplicos (con B cámbico) forestales	100-200	5.0-5.7
Leptosoles	50-100	4.0-6.0
Umbrisoles háplicos (con B cámbico) cultivados	20-50	2.0-3.0

Tabla 5.- Contenidos medios de Carbono en los principales tipos de suelos y usos agronómicos de Galicia. (Macías et al., 1999).

las principales limitaciones. Los contenidos de C en suelos naturales oscilan entre 4 y 12% aunque existen suelos de tipo Histosol en los que se supera el 40% de C. Esto implica que los suelos de Galicia son, en este momento, un importantísimo reservorio de carbono (Tabla 5).

Asimismo se ponen de manifiesto los principales factores que influyen en el contenido de Carbono de los suelos tales como las condiciones climáticas (valores mínimos en la Galicia continental siguiendo las cuencas del Miño y Sil y zonas de las Mariñas y Rías Bajas, todas ellas áreas en las que el balance P-ETP da origen a un mayor número de días de sequía edáfica), topográficas (áreas de montaña, con contenidos superiores al 12% que pueden alcanzar porcentajes de Carbono entre el 40 al 55% en los Histosoles de las Sierras del Xistral, Ancares y Caurel), así como la importancia de los componentes y tipos de procesos edáficos y del uso del suelo.

En muestras representativas de los suelos bajo diferentes condiciones climáticas se ha comprobado que los suelos que presentan una mayor capacidad de acumulación de Carbono son los Histosoles y los suelos hidromorfos, seguidos de los suelos con carácter cumúlrico, tanto cuando presentan propiedades ándicas como cuando tienen carácter aluminico (Tabla 5).

Estos datos ponen de manifiesto la enorme importancia de los suelos de Galicia como reservorio de carbono, ya que teniendo en cuenta la superficie ocupada por cada tipo de suelo y el porcentaje de distribución de los usos forestal y de cultivo se obtienen las siguientes estimaciones mínimas (no se han considerado los suelos cumúlricos ni los hísticos por su pequeña representación cartográfica) para la capacidad total de los suelos de Galicia como sumidero de carbono (Tabla 6).

El valor medio para Galicia es del orden de 200 t C/ha, que, a pesar de su importancia, es bastante más bajo que el obtenido por Harrison et al., 1995 para los suelos de Gran Bretaña, que representan un total de $22 \cdot 10^9$ t para una superficie unas 9 veces superior a la de Galicia) con una media de 957 t/ha. Sin embargo, si como afirman los autores anteriores, se considera que el 86% del C en Gran Bretaña está retenido en Histosoles los valores medios del resto de los suelos son prácticamente del mismo orden que los de Galicia. Además, debe tenerse en cuenta que el valor

medio del contenido de C está influenciado por dos hechos que pueden ser subsanados: el bajo porcentaje de C presente en los suelos cultivados (unas 800.000 ha en las que el valor medio es de 35 t/ha) y la gran extensión ocupada por suelos con un bajo espesor (Leptosoles y Regosoles de fase somera). Cambios de uso del suelo (p.e. paso de cultivos marginales a sistemas forestales o de praderas) y medidas de protección contra la erosión que favorezcan la biostaxia podrían aumentar significativamente el sumidero de C en el suelo. En el primer caso se encontrarían aproximadamente unas 400.000 ha que podrían representar un incremento de la fijación de al menos $0.5 \cdot 10^8$ tC.

Otro valor que debe considerarse es que los contenidos medios por cm de suelo son bastante próximos entre todos los tipos de suelos con vegetación a monte o forestal y que un incremento del espesor del suelo lleva consigo un importante incremento en el total de C retenido en el suelo. La lucha contra la erosión de los suelos es, por tanto, clave en el incremento de la capacidad de fijación de C, especialmente si se tiene en cuenta que estos suelos (Leptosoles y Umbrisoles de fase somera constituyen una parte muy importante de los suelos de Galicia (43%). En cuanto a la acumulación los estudios realizados demuestran que los suelos que más C acumulan son los Histosoles y los suelos cumúlricos, tanto ándicos como aluminicos. Por centímetro de horizonte Ah los valores máximos encontrados son los existentes en suelos de carácter ándico y en suelos de fase cumúlrica ricos en aluminio activo (Tabla 7) lo que, junto con la elevada edad media de la materia orgánica de estos suelos demuestra el papel importante de los compuestos de bajo grado de orden y las formas de Al reactivas en condiciones de pH ácido (4.0-5.5) en la estabilización de la materia orgánica.

Umbrisoles de fase somera	$1,1-2,9 \cdot 10^8$ t C
Andosoles	$0,3-0,4 \cdot 10^8$ t C
Umbrisoles con B cámbico (forestal)	$0,7-1,4 \cdot 10^8$ t C
Umbrisoles con B cámbico (cultivos)	$0,1-0,4 \cdot 10^8$ t C
Total	$2,3-5,3 \cdot 10^8$ t C

Tabla 6.- Contenido de C fijado en los principales tipos de suelos de Galicia (Macías et al., 1999).

	Tm/ha	Tm/ha/cm(hor.A)	Edad (años)
Andosol fase cumúllica	514	7.82	1070
Umbrisol fase cumúllica	924	12.00	1500
Histosol sáprico	1037	4.55	>2000
Umbrisol fase somera	155	7.74	-
Leptosol úmbrico	93	6.22	-
Umbrisol ferrali-ándico	194	9.66	-
Umbrisol háplico	1201	5.74	-
Umbrisol.háplico (cultivo)	36	2.75	-

Tabla 7.- Datos de acumulación de C (Tm/ha y Tm/ha/cm) y edad media de la materia orgánica (años) en algunos suelos representativos de Galicia.(Macías et al., 1999).

Sin duda, las condiciones de los suelos de Galicia para la retención de C no son generalizables a todo el territorio peninsular, pero demuestran que las actuaciones tendentes al incremento de la fijación de C en biomasa y suelos deben realizarse dando prioridad a las zonas de clima lluvioso, con fuerte lavado, pH ácido y altos contenidos de formas de Al reactivas existentes en las zonas de la España húmeda y en áreas de montañas sobre sustratos no calcáreos. En otros lugares la eficiencia está mucho más comprometida pero aún así, las actuaciones de conservación de suelos contra la erosión y el abandono de los cultivos marginales manteniendo coberturas permanentes puede incrementar significativamente el ya importante sumidero edáfico de C y, junto con el incremento del sumidero de la biomasa (Macías et al., 2001), pueden representar actuaciones a corto plazo tan o más importantes que las de reducción de las emisiones o al menos, pueden contribuir a mitigar sus efectos si bien pueden no ser reconocidas por las normas acordadas en el Protocolo de Kioto. Los datos presentados por Lal et al., 1997 y 1999 a y b o Follet et al., 2000 para EEUU, o Sequi (1998) en Italia (un incremento del 0.26% del contenido de materia orgánica en los suelos cultivados y en la biomasa es equivalente a las emisiones producidas por los combustibles fósiles y un incremento del 0.25% de carbono supone el total de emisiones de Austria), y otros muchos autores, van en este mismo sentido y confirman la enorme importancia que supone impedir la erosión y, en lo posible, favorecer el incremento de espesor del suelo. Un incremento de 1 cm de suelo en Galicia supondría un incremento de la capacidad de sumidero del orden de 15 millones de tC.

Gestión de residuos, efecto sumidero y recuperación de suelos degradados. Necesidad de una concepción integral de las actuaciones

El incremento exponencial en la producción mundial de residuos de los últimos años ha exigido la utilización de los suelos como sistema de gestión, especialmente si se tiene en cuenta que constituye el procedimiento actualmente vigente de mayor economía y los efectos positivos indirectos que compensan parcialmente de los efectos

nocivos en muchas situaciones. Las tendencias de producción de residuos siguen siendo al alza a pesar de los intentos realizados para frenar la producción de residuos. Algunas zonas de USA han superado los 5 kg/habitante/día de RSU y el kg/hab/día de lodos de depuradoras de aguas residuales. Hue (1995) estimaba que la producción de lodos aumentaría de 8.5.10⁶ Tm/año en 1990 a 12.10⁶ tm/año en el 2000 y factores de incremento similares se han producido en países como Alemania, Reino Unido o Italia. Además, la obligatoriedad de la depuración en los núcleos urbanos propuesta por la nueva Directiva incrementará enormemente esta situación y obligará a utilizar nuevas extensiones de suelos para su gestión, especialmente si se tiene en cuenta la mayor presión legislativa sobre el vertido a sistemas fluviales, aguas marinas costeras y el incremento de los costes en la gestión a través de vertederos controlados y procesos de incineración. Algo similar ocurrirá con la gestión de la fracción orgánica de los RSU y de una gran parte de los residuos agroindustriales que son vertidos a los suelos en muchos casos directamente o previamente compostados (Stratton et al., 1995; Mustin, 1987; Robert, 1994 y 96; etc) siendo la cifra expuesta en la estrategia de 1000 millones de toneladas de materia orgánica exógena un auténtico reto para los próximos años.

El suelo tiene un gran poder de depuración aunque con fuertes variaciones según sus condiciones edafoclimáticas y la gestión tecnológica que se realice. En todo caso su utilización como depuradora o almacén de compuestos orgánicos pasa por la garantía de la sostenibilidad de sus funciones, lo que exige un conocimiento preciso de la capacidad depuradora para cada tipo de contaminantes en cada tipo o proceso que se realice y de los efectos ambientales de los diferentes componentes añadidos. A pesar de ello, los conocimientos disponibles indican que una adecuada gestión ambiental que reúna los diferentes objetivos que han sido tratados, la recuperación de suelos contaminados y/o degradados y el incremento de la cantidad y estabilidad de Carbono secuestrado en suelos y biomasa pueden lograrse en gran medida a través de una gestión adecuada de determinados residuos potenciando esta concepción integral tanto la mejora de la calidad ambiental como la economía de los diferentes procesos.

Bibliografía

- Barth, H., L'Hermite, P. (1986). *Scientific Basis for Soil Protection in the European Community*. Elsevier Applied Science. London.
- Bachmann A., Walet P., Wijnen P., Bruin W de, Huntjens J.L., Roelofsen W., Zehnder A.J. (1988). Biodegradation of alpha and beta-hexachlorocyclohexane in a soil slurry under different redox conditions. *Applied and Environmental Microbiology*, 143-149.
- Bachmann A., Bruin W de, Jumelet J.C., Rijnaarts H.H., Zehnder A.J. (1988). Aerobic biomineralization of alpha-hexachlorocyclohexane in contaminated soil. *Applied and Environmental Microbiology*, 548-554.
- Boswell, F.C., Meisinger, J.J., Case, N.L. (1985). *Fertilizer Technology and Use*, Engelstad, O.P., Ed., SSSA, Madison, 229.
- Calvo de Anta, R., Macías, F., Riveiro, A. (1992). Aptitud agronómica de los suelos de la provincia de La Coruña (Cultivos, pinos, robles, eucaliptos y castaños). *Diputación Provincial. La Coruña*.
- Davies, M.C.R. (1991). *Land Reclamation: An end to Dereliction*. Elsevier Applied Science. London.
- Doran, J. W., Jones, A.J. (1996). *Methods for Assessing Soil Quality*. SSSA Special Publication nº 49. Madison.
- Eswaran H., Vandenberg E., Reich P., Kimble J. (1995). Global Soil Carbon Resources. In: *Soils and Global Change*, Lal R., Kimble J., Levine E. (Eds.), Stewart B.A. CRC/Lewis Publishers, Boca Raton, 1995, pp. 27-43.
- European Environment Agency. (1998). *Europe's Environment: The Second Assessment*. Elsevier Science. Oxford.
- European commission. (2004). *Soil Thematic Strategy Technical working Group "Organic Matter". Task 4: Responses: Exogenous organic matter*.
- Follet, R.F., Kimble, J.M., Li, R. (2001). *The potential of U.S. Grazing Lands to Sequester Carbon and mitigate the Greenhouse Effect*. Lewis Publishers. Boca Raton.
- Germon, J.C. (1985). Le Sol, un système épurateur efficace... s'il est bien géré. *Rev. Du Palais de la Découverte* 133: 19-41
- Hue, N.V. (1995). Sewage sludge. In Reichcigl, (ed) "Soil Amendments and Environmental Quality". CRC Lewis. Boca Ratón 199-247.
- Jones, K.C. (1991). *Organic contaminants in the Environment*. Elsevier Applied Science. London.
- Kimble, J.M., Lal, R., Follet, R.F. (2002). *Agricultural Practices and Policies for Carbon Sequestration in Soil*. Lewis Publishers.
- Lal, R. (1997). Residue management, conservation, tillage and soil restoration for mitigating greenhouse effect by CO₂-enrichment. *Soil and Tillage Research* 43, 319-464.
- Lal, R. et al. (1999). The potential of U.S. Cropland to Sequester Carbon and Mitigate the Greenhouse Effect. *Ann Arbor Press. Chelsea, MI*.
- Lal, R. (1999). Soil management and restoration for sequestration to mitigate the accelerated greenhouse effect. *Progress in environmental Science* 1, 307-326.
- Lal, R. (2000). World cropland soils as a source or sink for atmospheric carbon. *Adv. Agron.*, 71: 145-191.
- Lal, R. (Ed.), (2001). *Soil Carbon Sequestration and the Greenhouse Effect*. SSSA Special publication number 57.
- Macías, F. (Dir.), (1999). Informe final del proyecto "Procesos de fijación de carbono en sistemas superficiales del Noroeste de España: Elaboración de estrategias de reducción de CO₂ atmosférico a través del suelo y la biomasa". CICYT.
- Macías, F., Calvo de Anta, R. (1992). Caractérisation pédogéochimique des sols de la Galice en relation avec la diversification lithologique. Mise en évidence d'un milieu de transition entre les domaines tempérés et subtropic. *C. R. Acad. Sci. Paris*, t 315, Série II, 1803-1810.
- Macías, F., Gil-Bueno, A., Monterroso, C. (2001). Fijación de Carbono en biomasa y suelos de mina revegetados con cultivos energéticos. *Congreso Forestal. Sierra Nevada*.
- Mustin, M. (1987). *Le compost: Gestion de la matière organique*. Ed. François Dubusc. Paris.
- Reichcigl, J.E. (1995). *Soil Amendments and Environmental Quality*. CRC Lewis. Boca Ratón.
- Robert, M. (1996). *Le Sol: Interface dans l'environnement, ressource pour le développement*. Masson
- Robert, M., Cambier, Ph., Juste, C. (1994). Conditions d'utilisation des boues de station d'épuration en agriculture. *Cahiers Agricultures* 3, 285-294.
- Robert, M., Saugier, B. (2001). Contribution des ecosystems continentaux à la sequestration du carbone. *Edafología (en prensa)*.
- Schlesinger, W.H. (1997). *Biogeochemistry: An Analysis of Global Change*. Academic Press, San Diego
- Sequi, P. (1998). *Compost Symposium, Viena. 1998*.
- Stratton, M.L., Barker, A.V., Reichcigl, J.E. (1995). *Compost*. In "Soil Amendments and Environmental Quality" (ed. Reichcigl, J.E). CRC Lewis. Boca Ratón. 249-309.