

Felipe Macías · Marta Camps Arbestain · Luis Rodríguez Lado

Alternativas de secuestro de carbono orgánico en suelos y biomasa de Galicia

Recibido: 4 Novembro 2005/ Aceptado: 21 Novembro 2005
© IBADER- Universidade de Santiago de Compostela 2005

Resumen Se realiza una revisión de la capacidad de secuestro de Carbono por los suelos y biomasa de Galicia discutiendo posibles alternativas y poniendo de manifiesto su importancia ambiental y económica.

Palabras clave Secuestro de carbono, suelo, biomasa, estabilidad de la materia orgánica.

Summary A review of the C sequestering capacity of soils and biomass of Galicia is presented here, together with a discussion of possible alternatives, and a description of the environmental and economical importance of this topic.

Key words Carbon sequestration, soil, biomass, organic matter stability

Introducción - El protocolo de Kyoto y los sumideros de Carbono

Ante los posibles riesgos de un forzamiento climático de gran duración e intensidad, derivado de las actividades antrópicas, se están realizando diferentes aproximaciones para tratar de mantener, y si es posible disminuir, la concentración de los gases de efecto invernadero (principalmente el CO₂ y el CH₄) mediante diferentes propuestas que tienen por objetivo la limitación de las

emisiones de estos gases a la atmósfera. Esta medida, sin duda la más eficaz, tiene importantes consecuencias económicas por las grandes modificaciones tecnológicas y socioeconómicas que deben realizarse en muy poco tiempo, existiendo, además, fuertes diferencias entre los países según la disponibilidad de sus recursos energéticos propios, la estructura de sus sistemas productivos y su nivel económico. Así, dentro de Europa, destaca la privilegiada posición de Francia, cuya producción energética le permite atender a sus necesidades (y cubrir actualmente las de casi la mitad de Europa) a partir de combustibles nucleares que, si bien tienen muchos otros problemas de gestión, no los causan en este sentido. El caso de Inglaterra y los países del entorno del Mar del Norte, debido a su disponibilidad de yacimientos propios de gas natural, también es favorable por la menor emisión que causa este combustible por unidad energética producida, frente a la situación de los países que se basan en otros combustibles fósiles, como España o Portugal, en los que, además, los yacimientos propios son prácticamente inexistentes (petróleo, gas) o bien insuficientes y de coste de extracción muy elevado respecto a los precios internacionales, como es la situación actual del carbón.

Diferencias similares en los recursos o en los tipos de estructura industrial permiten comprender gran parte de las controversias mostradas por los países ante las propuestas del Protocolo de Kyoto. Sin embargo, otro factor también ha creado fuertes discrepancias y es la diferente visión de la alternativa de reducir la concentración de gases de efecto invernadero, no sólo a través de una disminución de las emisiones sino, también, a través de su secuestro y acumulación en otros compartimientos geoquímicos, distintos al atmosférico, a los que se denominan "sumideros".

Ante esta disyuntiva, los países promotores del Protocolo de Kyoto, principalmente los europeos, han considerado que el esfuerzo debería concentrarse exclusivamente en la reducción rápida de las emisiones y, por eso, sus primeras propuestas no introducían ninguna posibilidad de contemplar los sumideros de carbono. Sin embargo, la

Felipe Macías · Marta Camps Arbestain
Dpto. Edafología y Química Agrícola. Fac. Biología. Univ.
Santiago. Campus Sur. Santiago de Compostela. edfmac@usc.es

Marta Camps Arbestain
Dirección actual: NEIKER. Instituto Vasco de Investigación y
Desarrollo Agrario. Berreaga Kalea 1. 48160 Derio-Vizcaya.

Luis Rodríguez Lado
Laboratorio de Tecnología Ambiental. Instituto de Investigaciones
Tecnológicas. Campus Sur. Santiago de Compostela.

posición de EEUU, especialmente tras los trabajos realizados por el actual Presidente de la Sociedad Americana de Ciencia del Suelo, Rattan Lal (1995, 1998, 1999, ...), se centró en tratar de dar mayor tiempo para la reconversión de su sistema industrial y energético mediante la mejora e incentivación de los sumideros, lo que, en su opinión, les permitiría realizar un cambio tecnológico más relajado puesto que, en sus cálculos, la adecuada utilización de los sumideros permitiría un retraso entre 30 y 50 años para la puesta en marcha progresiva de las diferentes medidas de disminución de las emisiones.

Después de grandes controversias, pues muchos de los promotores europeos no querían que se considerase ningún tipo de sumidero, la propuesta del Protocolo de Kyoto admitió (en su Artículo 3.3) la contabilización de los balances de C (emisiones o secuestro) derivadas de las actividades de *forestación*, *aforestación* y *reforestación*, pero considerando únicamente los cambios en el contenido de C en la biota. Más tarde, y con muchas más dificultades y críticas, se introdujeron (en el Artículo 3.4.) los cambios de C producidos como consecuencia de actividades de gestión del suelo, aceptando las de *gestión de cultivos*, *gestión de pastizales*, *revegetación* y *gestión forestal*, si bien restringidas al C fijado en la biomasa y con una importante limitación en la capacidad permitida para la fijación de C producida como consecuencia de actividades de gestión forestal que, en el caso de España, se limita a 0,67 millones de toneladas de C, cantidad tan insuficiente que puede ser triplicada solamente en Galicia y que podía haber sido recurrida, tal como hizo Rusia, a la que se le triplicó su contingencia previa. Esta limitación de la cantidad que puede ser fijada como consecuencia de actividades forestales resulta incomprensible ante una situación de forzamiento climático grave en la que parecería lógico fomentar al máximo la capacidad de secuestro, pero es una consecuencia más de la visión restrictiva de los sumideros que tenían y tienen los promotores del Protocolo, de la que son también ejemplos claros la no admisión en los balances de C. Bien así la capacidad de fijación de la biota plantada antes de 1990 (las emisiones de industrias instaladas antes de 1990 sí se cuentan) ni la de la vegetación espontánea que crece en un territorio, con lo que los bosques naturales quedan excluidos de los procesos de contabilización. Algunos de estos aspectos fueron seriamente criticados por diferentes investigadores e instituciones científicas. Así, la Academia de Ciencias de Francia (2000) señalaba, entre otras, las siguientes críticas:

El incremento de C en la biomasa forestal no significa necesariamente que un bosque almacene C, puesto que lo que ganan los árboles en su crecimiento puede perderlo el suelo y, en ese caso, el balance de secuestro no sería positivo. Para evitar estos errores deberían tenerse en cuenta también los cambios de C en el suelo que, aunque se admite como sumidero, no se contabiliza en el primer período de compromiso, si bien en los Acuerdos de Marrakech ya se tienen en cuenta debiendo contabilizarse 5 reservorios: madera muerta, biomasa aérea, raíces vivas, hojarasca y SOM (materia orgánica soluble), a no ser que se pueda demostrar que no actúan como emisores.

Existe el riesgo de que algunos estados corten sus bosques primarios o plantados antes de 1990, cuyo balance de C no es contabilizado, y luego los reforesten antes del primer periodo de verificación (2008). Esto llevaría a una situación paradójica puesto que no sólo se fomentaría la destrucción de un patrimonio natural considerable sino que el balance neto de las operaciones realizadas por estos países sería una emisión de CO₂ a la atmósfera y, sin embargo, recibirían un “bonus económico” del Protocolo al descontar de sus emisiones el C fijado en las nuevas plantaciones forestales.

Ningún artículo del Protocolo menciona la importancia de una buena gestión en los bosques anteriores a 1990, que son la mayoría, por lo que malas gestiones en estos bosques que induzcan emisiones netas de CO₂ no serían penalizadas.

Otros muchos autores (Sombroek, 1993; Lal, 1995; Smith et al. 1996; Lal, 1998; Batjes, 1999; Houghton, 1999; Smith, 1999; Robert, 2001;...), han criticado la no consideración de los cambios netos en el suelo, ya que tienen mayor importancia que los de la biomasa y pueden actuar como sumideros de C de mayor capacidad tal como se deduce de los datos sobre la distribución del C en los diferentes compartimentos geoquímicos (Tabla 1). Los acuerdos de Marrakech con el encargo al IPCC de desarrollar un método de cálculo van en la línea de solucionar este problema inicial del Protocolo.

El compartimento de mayor capacidad es el litológico, seguido del oceánico y de la cobertura edafológica que contiene actualmente unas dos veces más C que la biosfera y la atmósfera juntas. Por otra parte, del C almacenado en la biomasa el que tiene un “ciclo de vida” más largo es el que se incorpora a la fracción húmica del suelo en formas de cierta estabilidad.

Posibilidades de secuestro de carbono en los sumideros

Posibilidades de actuación sobre los sumideros litológico y oceánico

En términos geoquímicos y dentro del proceso de forzamiento climático en el que nos encontramos se entiende por “Sumidero de C” cualquier sistema o proceso que sustrae un gas de efecto invernadero de la atmósfera. Los datos de la Tabla 1 ponen de manifiesto que el sumidero litosférico es el que tiene una mayor capacidad de almacenamiento de C, pero eso no significa que podamos utilizarlo inmediatamente para incorporar rápidamente más C a este sistema. Efectivamente, la utilización de este reservorio para mitigar o resolver la situación actual no parece factible a corto plazo ya que existen muchas incertidumbres en el conocimiento de los flujos y reacciones por las que el C se incorpora a los materiales que constituyen la corteza terrestre y la velocidad con que una vez en este compartimento se establecen nuevos equilibrios

RESERVORIO	C. inorgánico	C. orgánico	C total
Atmósfera	760	-	760
Biosfera	-	560	560
Edafosfera	1.700	1.500	3.200
Hidrosfera	38.000	1.000	39.000
Litosfera	4.800.0000	17.000.000	65.000.000

Tabla 1.- Comparación de la capacidad de los diferentes reservorios de Carbono según diferentes autores (Lal et al. 2001). Datos en Gt C= 109 tC.

con los otros reservorios. Nuevas investigaciones en curso podrían modificar sustancialmente esta visión y constituir una adecuada solución al problema del efecto invernadero.

El compartimento oceánico también puede ser una interesante aportación que está siendo estudiada, existiendo dos procesos que parecen interesantes. Por una parte, el incremento de los procesos de fijación biológica de C en la biomasa marina, p.ej: en cultivos de algas, moluscos,... En este sentido, sólo el cultivo de mejillón en bateas de las rías gallegas presenta una fijación de C estimada en unas 40.000 t CO₂ año⁻¹ que puede parecer muy poco pues las emisiones totales gallegas superan los 20 millones anuales pero que, en términos económicos sería importante poder contabilizarlo ya que la UDA (unidad de absorción equivalente a una tonelada de CO₂) tiene un precio actual en torno a los 20 \$. Sin embargo, esto no es posible ya que el Protocolo, en su redacción actual, sólo admite como C contabilizable el CO₂ secuestrado de la atmósfera en actividades de uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura. Otra cosa sería si el CO₂ que se emite en procesos industriales fuese utilizado y secuestrado en cultivos de algas o moluscos, en cuyo caso sería contabilizado puesto que se reducirían las cifras de emisión y éstas sí entran en el balance admitido por el Protocolo. Lo mismo sucede con otra posibilidad que están investigando algunos países del norte de Europa, que consiste en el transporte del CO₂ producido en procesos industriales a capas profundas de aguas marinas en las que el CO₂ se disolvería por las bajas temperaturas existentes y se mantendría estable, encapsulado durante largo tiempo, por la fuerte estratificación que presentan estas capas de agua frías y profundas. Obviamente, las dificultades tecnológicas son considerables pero se está considerando.

Actuaciones sobre los sumideros edáficos y bióticos

En el sumidero edáfico existen diferentes formas de C. Las orgánicas, procedentes en último caso del C previamente almacenado en la biota y las inorgánicas, una parte de las cuales se ha originado por la carbonatación del calcio liberado en los procesos de alteración mineral por el CO₂ atmosférico o el liberado por la respiración de los diferentes organismos del suelo. Esto permite poder secuestrar C, tanto directamente en el suelo como indirectamente a través

del compartimento biótico, pero es este último mecanismo el mejor conocido puesto que el proceso de acumulación de C en el suelo procedente de los restos vegetales y animales (la humificación) ha sido ampliamente estudiado. Además, en el caso de zonas húmedas como Galicia no se produce acumulación de C inorgánico en los suelos, por lo que este mecanismo no puede ser tenido en cuenta aunque sí debe considerarse cuando se trata de regiones xéricas o áridas.

En el caso de Galicia al entrar el C exclusivamente por vía orgánica, son las interacciones suelo-planta y los posibles aportes de materia orgánica alóctona los procesos que deben ser considerados. La vegetación actúa como sumidero de CO₂, al extraer este gas de la atmósfera mediante la fotosíntesis y acumular en sus tejidos el carbono fijado. Parte del carbono presente en la biomasa vegetal se libera a la atmósfera en los procesos de respiración (durante el ciclo de vida de la planta) y de descomposición (una vez los tejidos vegetales han llegado al final de su ciclo), mientras que el resto del carbono se acumula en la madera (sumidero temporal) y en la materia orgánica del suelo (sumidero relativamente permanente con ciclos de vida que oscilan entre años y milenios). En ecosistemas terrestres naturales este proceso de acumulación de carbono alcanza, con el tiempo, un valor de stock de carbono orgánico más o menos estable o en equilibrio que depende, entre otros factores, de la especie vegetal, el clima, la topografía, la litología, y el tipo de suelo. Las perturbaciones que se producen, como laboreo, talas masivas, incendios, erosión, etc., afectan a la dinámica del carbono de los ecosistemas terrestres que, a menudo, han pasado a actuar como fuente de carbono. Hasta 1970 la responsabilidad en el aporte de C a la atmósfera estaba principalmente relacionado con las actividades agrícolas que superaban a los aportes industriales y a los producidos por el transporte. Aún ahora, Lal (2001) estima que la agricultura representa el 25% de las emisiones globales, a pesar de que ya se han producido en algunos lugares actuaciones que tienden a reconvertir las actividades agrícolas en procesos que favorecen el secuestro de carbono atmosférico y reducen su emisión.

Cálculos realizados en diferentes zonas de Galicia han permitido comprobar que los suelos cultivados tienen entre un 30 y un 50% menos de C que los suelos con vegetación natural o forestal bajo las mismas condiciones climáticas y litológicas, mientras que los suelos de praderas han perdido entre un 25 y un 30% de su C original (Macías & Calvo de Anta, 2001). La consecuencia de estos datos es que las labores agrícolas reducen significativamente la acumulación de C en el sumidero edáfico respecto a los sistemas forestales, confirmándose lo observado por otros autores en diferentes latitudes.

Para invertir esta tendencia deberían modificarse algunas prácticas agrícolas teniendo en cuenta la experiencia obtenida. El mismo Lal propuso una serie de ellas, aplicables en EEUU y el resto de los países que generarían una importante reducción del CO₂ atmosférico (Tabla 2).

Se observa que las que presentan una mayor tasa potencial de secuestro son la fertilización forestal y la restauración de los suelos de mina y de otros degradados puesto que, en el

Práctica	Tasa potencial de secuestro de C (t ha ⁻¹ año ⁻¹)
Laboreo de conservación	0,1-0,5
Compost y abonos orgánicos	0,05-0,5
Eliminación del barbecho de verano	0,05-0,4
Cosechas protectoras de invierno	0,2-0,5
Agricultura de precisión	0,1-0,4
Mejora de variedades y sistemas de cultivo	0,05-0,4
Conservación del agua y gestión de acuíferos	0,05-0,3
Mejora en el manejo del pasto	0,05-0,3
Aforestación / Reforestación	0,08-0,4
Uso de fertilizantes en suelos y biomasa forestales	0,8-3,0
Restauración de suelos de mina y otros suelos degradados	0,3-1

Tabla 2.- Prácticas recomendadas para el secuestro de C (Lal, 2001).

primer caso, se incrementaría la capacidad productiva de estos sistemas, generalmente siempre gestionados como sistemas extractivos pero que no reciben o muy escasamente aportes de nutrientes y en el segundo, se recuperarían suelos totalmente improductivos y muy expoliados. Por supuesto, estas dos propuestas de mejora son susceptibles de utilizarse en Galicia y conducirían a un importante incremento del secuestro de C tal como ya se ha comprobado en repetidas ocasiones.

Además, entre otras actuaciones de mejora de la gestión ambiental sería necesario incrementar la cantidad de materia orgánica aportada a los suelos mediante la incorporación de mayores cantidades de estiércoles, cosechas en verde o residuos ricos en materia orgánica y, sobre todo, deberían realizarse actividades que han sido consideradas propias de las agriculturas de conservación tales como la siembra directa o la agricultura de laboreo mínimo (Foto 1). En este sentido, la disminución del laboreo y de la duración de los períodos sin cobertura vegetal son otros factores favorables. En resumen, experiencias realizadas por Lal (2001) y otros autores confirman que se puede invertir la situación actual, de modo que los suelos agrícolas dejen de actuar como fuente de carbono y pasen a ser sumideros mediante la aplicación de diferentes técnicas de gestión, estimando estos autores cifras de secuestro del orden de 0,5 a 1 t C ha⁻¹ año⁻¹.

Obviamente, el cambio a uso forestal debe permitir una recuperación de los niveles propios de estos medios, lo que al menos debería realizarse en las tierras de cultivo marginales, abandonadas y/o con bajos rendimientos agrícolas. Una correcta gestión de las plantaciones forestales favorecería la acumulación de carbono en biomasa – ya que la masa forestal renovada continúa fijando carbono (y con mayor intensidad) – si además se fomenta la obtención de productos madereros de ciclo de vida largo.

Cuando se discute la posibilidad de utilizar a los suelos como sumideros de C suele considerarse que su capacidad es difícilmente utilizable por los siguientes motivos:

Se considera que la capacidad de sumidero de C de los suelos es, en general, pequeña y ligada a la abundancia y tipo de vegetación.

Se considera que el contenido de C de los suelos está en equilibrio con las condiciones climáticas y que, por tanto, no es posible realizar variaciones significativas sobre su capacidad de almacenamiento sin modificar previamente aquéllas.

Se considera que el equilibrio que define el contenido de C de los suelos se alcanza muy rápidamente y que el tiempo de residencia del C en el suelo es efímero, al estar sometido a ciclos muy rápidos de renovación por medio de los mecanismos de descomposición biótica y oxidativa.

Estas ideas proceden de la observación de la distribución de los tipos de suelos a escalas de poco detalle. Así, cualquier observación de un Mapa Mundial de Suelos, como el presentado por el USDA en 1998, permite apreciar la existencia de una importante zonalidad en la distribución de los suelos que se asocia a las variaciones climáticas, al igual que la distribución de la vegetación. Así, sería de esperar que los suelos de una determinada región deberían contener cantidades similares de C en respuesta a la actuación del clima sobre la vegetación y al aporte de C que ésta realiza, considerando a los procesos biogénicos como los únicos responsables del contenido de C de los suelos. Esta idea se refuerza por la rápida velocidad de formación y alcance de una situación de equilibrio que se produce en los horizontes ricos en materia orgánica, a los que normalmente se considera que pueden alcanzar condiciones de equilibrio en ciclos del orden de unos pocos siglos. De acuerdo con esto, la capacidad de reservorio de C de los suelos debería estar saturada para las actuales condiciones climáticas y cualquier proceso de ganancia llevaría implícita la necesaria liberación del C sobrante para mantener la condición de equilibrio.

Sin duda, estas ideas tienen fundamentos lógicos basados en el conocimiento de los suelos, pero son extremadamente reduccionistas al no tener en cuenta la influencia de otros

factores y procesos de formación de suelos que pueden modificar significativamente la situación de equilibrio en el contenido y estabilidad del C de cada tipo de suelo y, por tanto, modificar fuertemente su balance sumidero-fuente. Algunas ideas a tener en cuenta para el establecimiento de las políticas de actuación son, entre otras, las siguientes:

1.- *El C de los suelos no tiene un origen exclusivamente orgánico* sino que una parte significativa, aproximadamente igual o ligeramente superior según las estimaciones de Eswaran et al. (1995), es C inorgánico (Tabla 3).

Por ello, es necesario tener en cuenta los procesos de incorporación y secuestro de este C en los suelos de climas secos en los que, además, tiene un largo período de

Tipo de Suelo	C orgánico	C inorgánico
Ultisoles	101	0
Andisoles	69	1
Aridisoles	110	1.044
Oxisoles	150	0
Inceptisoles	267	258
Alfisolos	136	127
Mollisoles	72	139
Vertisoles	38	25
Spodosoles	98	0
Entisoles	106	117
Histosoles	390	0
Otros	18	0
TOTAL	1.555	1.738

Tabla 3.- Estimación del contenido de C orgánico e inorgánico (en GtC) en los suelos del mundo hasta una profundidad de 1 m (Eswaran et al., 1995).

permanencia en el suelo si no se modifican las condiciones de edafogénesis.

Todos los Ordenes de suelos anteriores existen en Galicia excepto el de los Aridisoles, pero la gran mayoría pertenecen a los Inceptisoles.

2.- *El sumidero de C edáfico puede ser muy importante y variar entre límites muy amplios según el tipo de suelo dentro de una misma región climática.* La distribución espacial del contenido de C de los suelos de Galicia no refleja la influencia de las condiciones climáticas cuando se realiza un análisis del contenido de C del horizonte superficial. Un estudio realizado con más de 1.000 muestras de suelos desarrollados sobre diferentes materiales de partida y con diferentes tipos de usos sólo permite identificar la existencia de zonas de alta concentración de C asociadas a zonas de rocas básicas y a zonas hidromorfas o de montaña con vegetación natural o forestal. También se aprecia la existencia de bajos contenidos de C en las áreas de menores precipitaciones y períodos de sequía de mayor duración y, lógicamente en las áreas en las que el suelo ha sido degradado por erosión y predominan los suelos de muy escaso espesor (Leptosoles) (Figura 1 y Tablas 3 y 4). Para

otros tipos de usos, y especialmente para los cultivos, no se aprecia una buena correlación con los factores climáticos y la relación con la litología, aunque existe, es más difusa, lo que pone de manifiesto que en estos suelos es la acción humana la que introduce una fuerte heterogeneidad.

A ello habría que añadir que algunos suelos no representables a esta escala, como los Histosoles de las Sierras del Buio y Xistral, pueden retener cifras considerables habiéndose encontrado suelos con cerca de 4.000 tC ha⁻¹ almacenada. Una síntesis de la variabilidad de contenidos de C de los suelos de Galicia fue elaborada por Macías et al. (1999), observando que varían entre cifras tan bajas como 20 t C ha⁻¹ a valores superiores a 3.000 t C ha⁻¹ (ver Tabla 5).

Estos datos confirman que la capacidad de sumidero de los suelos puede ser muy elevada. Basta con tener en cuenta que Galicia tiene una superficie del orden de 3 millones de ha y que en sus suelos se encuentra retenida una cifra de C del orden de 615 millones de t C con un valor medio algo superior a 200 t C ha⁻¹ que es, probablemente, la cifra más elevada dentro del contexto de la Europa Sur.

Los procesos edáficos que inducen una mayor capacidad de secuestro por unidad de superficie son la *turberización* y la *gleificación* o *hidromorfismo*, seguidos de forma importante por la *andosolización* y la *aluminización* o formación de suelos ácidos ricos en formas de Al reactivo. Los dos primeros procesos están ligados a situaciones climáticas frías y/o a topografías deprimidas que permiten un almacenamiento del agua durante largos períodos de tiempo. Esto implica que cambios en las condiciones de drenaje pueden llevar consigo modificaciones sustanciales en la capacidad de almacenamiento. En general, la superficie en la que aparecen estos suelos ha sido fuertemente reducida tanto por actuaciones realizadas con fines agrícolas como por las derivadas de los cambios de uso debidos a la urbanización (carreteras, líneas de ferrocarril, vivienda, infraestructuras industriales,...). Así, la desecación de humedales producida durante la expansión agrícola del siglo XX ha originado un fuerte descenso del sumidero de estos medios mientras que las tareas de recuperación de humedales, iniciadas a finales del siglo pasado, deben favorecer su incremento. Por lo mismo, actuaciones tendentes a la reducción de la velocidad de drenaje y a la elevación del nivel freático irían en el mismo sentido, lo que obliga a pensar en las consecuencias de muchas actuaciones de gestión del territorio que realizamos y que producen una disminución de la superficie ocupada por los suelos hidromorfos y las turberas que siempre debería ser compensada por un incremento mayor de la superficie recuperada o mejorada de estas formaciones. En consecuencia, podría concluirse que, además de mejorar el conocimiento cartográfico de la distribución de estos suelos y las normas de conservación que los protegen, debe minimizarse y, en lo posible, invertir la tendencia a la desecación de los suelos hidromorfos, favoreciendo la existencia de áreas encharcadas (humedales) y de zonas con drenaje ralentizado o impedido. En este caso son particularmente importantes las actuaciones que conducen a una elevación del nivel freático y a la reducción de factores negativos para su conservación, como las cunetas

Suelo	Leyenda	tC ha ⁻¹ mín.	tC ha ⁻¹ max.	tC ha ⁻¹ media
SG(LPu-RGu(LPq))	Leptosoles alumi-úmbricos y Regosoles alumi-úmbricos (inclusiones de Leptosoles alumi-líticos)	50	100	75
SG(RGu-CMu)	Regosoles alumi-úmbricos y Cambisoles alumi-húmicos	100	250	175
SG(CMu-RGu)	Cambisoles húmicos (inclusiones de Regosoles úmbricos)	200	400	300
SG(CMd)	Cambisoles dístricos (inclusiones de Regosoles dístricos)	20	50	35
SE(RGu-LPu)	Regosoles alumi-úmbricos y Leptosoles alumi-úmbricos	50	100	75
SE(CMu)	Cambisoles alumi-húmicos	200	400	300
SE(CMu/o)	Cambisoles ferrali-alumi-húmicos	200	400	300
SE(CMd-CMu)	Cambisoles dístricos y Cambisoles húmicos	20	50	35
SE(CMu-CMu/o)	Cambisoles húmicos y Cambisoles ferrali-húmicos	20	50	35
SE(RGd-LPd)	Regosoles alumi-dístricos y Leptosoles alumi-dístricos	100	250	175
SE(CMd)	Cambisoles dístricos y Cambisoles alumi-dístricos	100	250	175
SPF(RGu-Lpu)	Regosoles alumi-úmbricos y Leptosoles alumi-úmbricos	100	250	175
SPF(CMu-Rgu)	Cambisoles alumi-húmicos y Regosoles alumi-úmbricos	200	400	300
SPF(CMu)	Cambisoles húmicos	200	400	300
SPF(RGd-LPd)	Regosoles alumi-dístricos y Leptosoles alumi-dístricos	50	100	75
SPF(CMd)	Cambisoles dístricos	50	100	75
SRB(LPu)	Leptosoles andi-úmbricos	150	300	225
SRB(CMo-ANu)	Cambisoles andi-ferrálicos y Andosoles úmbricos	300	600	450
SRB(CMu-CMu/o)	Cambisoles húmicos y Cambisoles ferrali-húmicos	300	600	450
SUL(LPm(PHh))	Leptosoles rudi-mólicicos (inclusiones de Phaeozem rudi-háplicos)	50	100	75
SUL(CMx-PHh(Glu))	Cambisoles rudi-crómicos y Phaeozem rudi-háplicos (inclusiones de Gleysoles úmbricos)	100	250	175
SC(RGu-LPu(PZh))	Regosoles alumi-úmbricos y Leptosoles alumi-úmbricos (inclusiones de Podsoles háplicos e Histosoles fibricos y térricos)	100	250 (>3.000*)	175
SCa (LPk-PHc)	Leptosoles rudi-réndsicos y Phaeozem rudi-calcáreos	50	100	75
SCa (CMu-CMe)	Cambisoles húmicos y Cambisoles éutricos	100	250	175
SMS(FLs-FLt)	Fluvisoles sálicos y tiónicos (inclusiones de Fluvisoles calcáreos)	200	400	300
SMS(Flu-FLd(Glu))	Fluvisoles úmbricos y dístricos (inclusiones de Gleysoles úmbricos)	100	250	175
SMS(Arar)	Arenosoles álbicos	20	50	35
SMS(ALh-RGd(CMd))	Alisoles háplicos y Regosoles dístricos (inclusiones de Cambisoles dístricos)	100	250	175
SMS(CMu-Glu(PZh))	Cambisoles húmicos y gléicos (inclusiones de Podsoles háplicos)	200	400	300
SMS(ALh-Rgu(CMu))	Alisoles háplicos y Regosoles úmbricos (inclusiones de Cambisoles húmicos)	200	400	300
SMS(CMd-Alhff(FLd-FLu))	Cambisoles dístricos y Alisoles ferri-háplicos (inclusiones de Fluvisoles dístricos y húmicos)	200	400	300
SMS(FLd-RGd(GLu))	Fluvisoles gley-dístricos y Regosoles gley-dístricos (inclusiones de Gleysoles húmicos)	100	250	175

Tabla 4.- Contenido máximo, mínimo y medio de C por unidad edáfica (en tC ha⁻¹) del mapa de suelos de Galicia (basado en el Mapa de Suelos de Galicia Escala 1:500.000; Macías & Calvo de Anta, 2001).

Suelo	Leyenda	tC ha ⁻¹ mín.	tC ha ⁻¹ max.	tC ha ⁻¹ media
SMS(CMu-Alh)	Cambisoles gley-húmicos y Alisoles háplicos	20	50	35
SMS(RGd-Ata)	Regosoles dístricos y Antrosoles áricos	20	50	35
SMS(CMd/u-ALh)	Cambisoles dístricos y húmicos y Alisoles háplicos	20	50	35
ATu	Antrosoles úrbicos	20	50	35
Embalses	Embalses	0	0	0

Tabla 4 (continuación).- Contenido máximo, mínimo y medio de C por unidad edáfica (en tC ha⁻¹) del mapa de suelos de Galicia (basado en el Mapa de Suelos de Galicia Escala 1:500.000; Macías & Calvo de Anta, 2001).

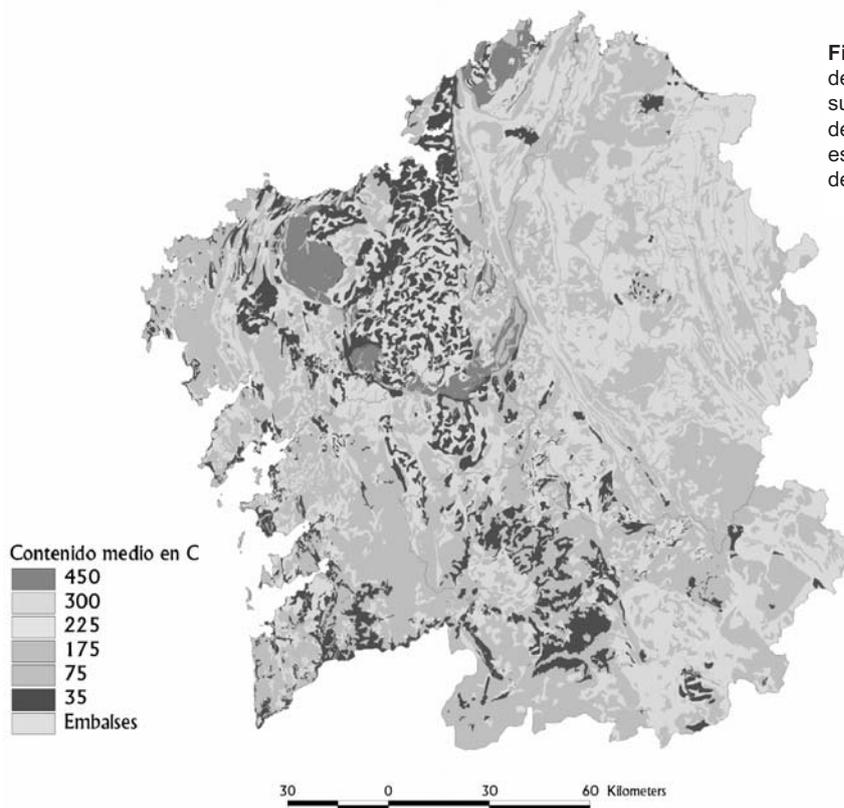


Figura 1.- Distribución cartográfica del contenido medio de C en suelos de Galicia (realizado a partir del Mapa de Suelos de Galicia, escala 1:500.000; Macías & Calvo de Anta, 2001).

Tipo de suelo	Contenido de C (t C ha ⁻¹)	(t C ha ⁻¹ cm ⁻¹)	Superficie (ha)	t C.10 ⁶ secuestradas
Histosoles y Gleisoles húmicos	1.000-4.000	5,0-8,0	10.000	20
Andosoles	300-800	5,0-7,8	50.000	22,5
Suelos ándicos	150-300	4,5-5,2	100.000	22,5
Umbrisoles y Cambisoles húmicos (uso forestal)	200-400	5,0-7,5	1.340.000	402,0
Umbrisoles y Cambisoles de fase somera	100-250	4,0-6,0	600.000	105,0
Umbrisoles y Cambisoles cultivados	20-50	2,0-3,0	600.000	21,0
Leptosoles	50-100	4,0-6,0	300.000	22,5
TOTAL				615,5

Tabla 5.- Estimación sintética del sumidero de C de los suelos de Galicia (Macías & Calvo de Anta, 2001).

profundas de los vales y las pistas forestales excavadas en el terreno. Por el contrario, son positivas todas las actuaciones que generen un freno a la eliminación rápida del agua de estas formaciones y medidas como las propuestas en Parkyn et al. (1997) donde se demuestra que es posible la conservación y recuperación de estos tipos de hábitats. Asimismo, debe impedirse el cambio de uso de estos tipos de suelos hacia praderas sembradas ya que la fuerte fertilización y encalado que se requiere acelera la mineralización de la materia orgánica almacenada.

Tras los procesos de turberización y gleificación, la andosolización es el proceso más efectivo en la fijación de materia orgánica en el suelo. Los Andosoles se forman en Galicia sobre rocas consolidadas y materiales coluviales de composición básica, es decir ricos en minerales alterables, cuando éstos se presentan en superficies de exposición reciente (Holoceno). Se trata de suelos en los que es bien conocida su capacidad para retener aniones, entre ellos los orgánicos, y, también, de compuestos orgánicos sólidos mediante la formación de enlaces con los compuestos no cristalinos o en forma de complejos organometálicos con Fe o Al. Estos últimos son los dominantes en los Andosoles de Galicia que pertenecen al tipo denominado “*Andosoles alu-ándicos*” con horizontes de diagnóstico mayoritariamente *fúlvicos*. La acumulación de C parece estar relacionada con la estabilización de los compuestos húmicos a través de enlaces superficiales con componentes amorfos de elevada reactividad, formando complejos organoaluminicos y complejos de adsorción humus-aluminosilicatos de bajo grado de orden con diferentes grados de labilidad (Macías & Calvo de Anta, 1992). Aunque todavía es poco conocido el proceso de acumulación de C en los suelos ándicos de Galicia, es particularmente eficiente en suelos localizados en las posiciones acumulativas de las laderas en áreas de elevada precipitación y humedad ambiental con vegetación permanente, arbórea o de matorral; mientras que son factores que disminuyen la capacidad de este reservorio la sequía, la desaparición de la cubierta vegetal y todas las actividades ligadas a la puesta en cultivo, como el encalado, fertilización, laboreo, etc., así como el tiempo de edafogénesis. Se ha comprobado (Verde et al. 2005) que la puesta en cultivo de estas formaciones provoca, en muy pocos años, una fuerte desestabilización y pérdida de las propiedades ándicas y, con ellas, una reducción del contenido de materia orgánica y de las formas de Al fácilmente extraíbles ligadas a complejos lábiles organo-alumínicos. De nuevo, la influencia humana puede conservar, incrementar o disminuir la eficacia de este sumidero edáfico mediante diferentes actuaciones, siendo especialmente negativas las de transformación del uso forestal al uso agrario con una alta intensidad de laboreo, fertilización y encalado y, por supuesto, la completa eliminación de la cobertura vegetal producida en las actuaciones de urbanización.

La correcta cartografía de estos suelos y su conservación bajo vegetación permanente parece obligada por su extraordinaria contribución como sumidero de C y, también, por lo que representan de “*edafodiversidad*” dentro del contexto de Galicia. Además, el estudio de los mecanismos de estabilización de la materia orgánica de éstos y otros

tipos de suelos puede servir para orientar la gestión de residuos a través de sistemas en los que se realice una previa estabilización, antes de su incorporación a los suelos, utilizando mecanismos similares a los que se han producido en suelos tan diferentes como los Andosoles, Vertisoles húmicos, Mollisoles, Latosoles húmicos, Umbrisoles o en los horizontes espódicos, sómbricos o plaggen. Estos mecanismos están siendo actualmente estudiados por diferentes investigadores.

Una situación similar es la de los suelos aluminicos (Umbrisoles, Leptosoles y Cambisoles húmicos) fuertemente saturados en Al en su complejo de cambio. Aunque con menor intensidad que en los suelos ándicos, la presencia de formas de Al reactivas (Al disuelto, Al cambiante, complejos organoaluminicos, hidróxidos de Al microcristalinos, islotes de Al octaédrico en la intercapa de vermiculitas y enlaces de borde Al-OH de filosilicatos 1:1) son capaces de formar enlaces con la materia orgánica, ralentizando su mineralización por oxidación y metabolismo biótico. Esto explica que la materia orgánica de los suelos de Galicia presente dataciones medias muy superiores a las de los suelos de otras zonas templadas eutróficas o calcáreas. Se obtienen así valores medios entre 1.000 y 5.000 años para la materia orgánica de diferentes horizontes de suelos ándicos y de suelos ácidos ricos en Al reactivo, poniendo de manifiesto, una vez más, que la idea de que toda la materia orgánica de los suelos tiene un ciclo de vida corto no es adecuada, al menos para los suelos ácidos de esta zona y, muy probablemente, para la de todas aquellas en las que se produzca la presencia simultánea de materia orgánica con componentes minerales secundarios producidos en procesos de alteración mineral de cinética elevada; es decir, las zonas templadas o cálidas con elevada disponibilidad hídrica y rápido drenaje (Macías et al. 2005). Al igual que en los casos anteriores, las actuaciones humanas pueden conservar, aumentar o decrecer la importancia de este sumidero, siendo la erosión y la transformación en cultivos de alta intensidad de laboreo, con elevados inputs de encalantes y fertilizantes, los principales factores degradantes de esta capacidad de secuestro de Carbono, como se deduce fácilmente de la comparación de los datos de los Umbrisoles, Andosoles y Cambisoles de uso forestal que oscilan entre 4-8 t C ha⁻¹ cm⁻¹ del suelo mientras que en los suelos de cultivo similares estos valores se reducen considerablemente (2-3 t C ha⁻¹ cm⁻¹).

En este caso, ya que son los suelos dominantes en Galicia, las actuaciones deben ser fundamentalmente las conservativas y las favorecedoras del incremento de espesor del suelo y contenido de C. Por ello, se hace evidente la necesidad de diferentes actuaciones:

Evitar la erosión, pues cada centímetro de suelo que se pierde representa una elevada emisión de C a la atmósfera.

Favorecer y acelerar la formación de suelo, especialmente en las áreas degradadas previamente por erosión en las que los Leptosoles y los Umbrisoles o Regosoles de fase somera son dominantes. En este proceso de aceleración de la edafogénesis debe

tenerse en cuenta el importante papel de las plantas pioneras y frugales, fácilmente micorrizables y con rizosferas muy extensas y agresivas. Colonizadores como los pinos, abedules, eucalipto, genistas, etc., son las plantas que más rápidamente forman suelo e incorporan materia orgánica.

Reforestar o naturalizar los suelos de cultivo marginales.

Invertir los procesos de pérdida de C que suponen las técnicas de manejo actual del suelo.

Por otra parte, teniendo en cuenta la elevada heterogeneidad de los tipos de suelos de Galicia, es imprescindible conocer la distribución espacial de los diferentes tipos de suelos (cartografía de suelos a escala detallada) para poder realizar actuaciones adecuadas.

3.- La erosión y la agricultura convencional con alta intensidad de laboreo, encalado y fertilización son los procesos que inducen una mayor pérdida de la capacidad de secuestro de carbono edáfico

La comparación de los datos del stock de C en Andosoles (300-800 t C ha⁻¹) con los de los suelos ándicos cultivados (150-300 t C ha⁻¹) o de los Umbrisoles y Cambisoles de uso forestal (200-400 t C ha⁻¹) con los mismos suelos de fases someras (100-250 t C ha⁻¹), los Leptosoles (50-100 t C ha⁻¹) y los de los suelos cultivados (20-50 t C ha⁻¹), permite afirmar que la erosión y la puesta en cultivo intensivo son los factores que limitan fundamentalmente la capacidad de almacenamiento de C en los sistemas edáficos de Galicia. La importancia de las pérdidas por erosión también se deduce de la consideración de las toneladas de C almacenadas por ha y centímetro de suelo, que presenta valores muy próximos entre sí (entre 5 y 7 t C ha⁻¹ cm⁻¹) para todos los tipos de suelos, excepto los cultivados (2-3 t C ha⁻¹ cm⁻¹) y los suelos muy incipientes (4-6 t C ha⁻¹ cm⁻¹). Esto vuelve a poner de manifiesto la importancia de conservar, o mejor aún, de favorecer el desarrollo de los suelos. Así, con un valor medio de 6 t C ha⁻¹ cm⁻¹, un incremento de un centímetro en el espesor de los suelos de Galicia significaría un aumento del C almacenado del orden de 18.10⁶ t C. El efecto contrario se produciría con la pérdida por erosión, siendo todavía más acusada cuando el suelo debe reiniciar su evolución desde el material de partida, pues, como se ha visto, los suelos iniciales (Leptosoles y otros suelos de fase somera) tienen un menor contenido de C para el mismo espesor.

En esta línea de incrementar el contenido de C de los suelos no puede olvidarse el importantísimo papel que tiene la recuperación de los suelos contaminados o degradados que han perdido sus horizontes superficiales. Es el caso de los suelos de minas, canteras, vertederos, áreas industriales y de infraestructuras abandonadas, etc. En estos suelos, si las actuaciones de corrección de los limitantes y de selección de las plantas son adecuadas, se produce un rapidísimo e intenso proceso de acumulación de C al menos durante las fases iniciales de la restauración. Es el caso de los suelos recuperados en las escombreras de la mina de lignitos de As Pontes, en los que ensayos de producción de biomasa con eucalipto (*Eucalyptus globulus*) plantado en

marcos muy densos 1,0 x 0,5 m., cortados cada 2-3 años, produjeron una fijación de C de 16 t C ha⁻¹ año⁻¹ para el primer corte (Gil et al. 2000), estimándose que en un período de al menos 20 años podría fijarse C en estas condiciones a un ritmo medio de unas 10 t C ha⁻¹ año⁻¹. En las mismas escombreras de la mina, con vegetación de pradera o arbórea (*Alnus*,...) se han encontrado incrementos entre 3 y 25 t C ha⁻¹ para un período de 10 años (entre 1991 y 2001, Pérez Varela, 2002), siendo la incorporación rápida en los primeros años (3,5 t C ha⁻¹ año⁻¹ entre 1991 y 1996) y más lenta, pero significativa en los cinco años posteriores (0,22 t C ha⁻¹ año⁻¹ entre 1996 y 2001). Estos datos cobran valor si se tiene en cuenta que la superficie restaurada supera ya las 1.000 ha, y serán de cerca de 1.400 ha una vez finalizadas las obras de restauración y explotación, por lo que considerando una fijación media de al menos 1 t C ha⁻¹ año⁻¹ durante 20 años representaría una absorción de más de 100.000 t CO₂). Obviamente, la recuperación de todos los espacios mineros o degradados de Galicia como las canteras de pizarra y granito, las minas de sulfuros metálicos (Touro, Rubián,...) etc., representan un considerable potencial de secuestro.

En consecuencia, una política de conservación y recuperación de suelos es no sólo una política de mantenimiento de la capacidad actual de secuestro, sino un incremento de la capacidad de sumidero que se estima como mínimo en un 3% del total actual por centímetro de suelo generado.

4.- En los suelos existe una gran variedad de formas de Carbono con grandes diferencias de labilidad y tendencia al equilibrio con el medio. La presencia de formas de elevada estabilidad favorece el incremento del contenido de C en los suelos y, sobre todo, su persistencia, haciendo más eficaz al reservorio edáfico.

La idea de que el contenido de C edáfico tiende a un equilibrio con el medio y que una vez alcanzado apenas se modifica sólo es válida cuando se analiza exclusivamente el horizonte superficial y, aún en ese caso, no es totalmente correcta. Efectivamente, para unas condiciones dadas la actividad biológica tiende a alcanzar un equilibrio de modo que se compensan los procesos de ganancia y pérdida de materia orgánica una vez que se alcanza esa situación. Sin embargo, en los suelos hay muchas formas de C, con grados muy diferentes de estabilidad, de modo que algunas fracciones son especialmente recalitrantes y escapan durante largos períodos a la actuación de los procesos bióticos y a la tendencia de oxidación impuesta por la termodinámica.

Para comprobar esta afirmación en los suelos de Galicia se ha realizado un proceso de fraccionamiento de Carbono diferenciando los siguientes tipos de C: C soluble, C en la biomasa microbiana, C extraíble con pirofosfato, C oxidable con dicromato en medio ácido y C no oxidable (Macías et al. 1999). Las formas más lábiles, el C soluble y el C biomasa, apenas representan un pequeño porcentaje del total de C de los suelos estimándose que normalmente no superan el 2%. El C extraíble con pirofosfato representa lo que podría denominarse el "C humificado" o "C activo", formado por diferentes compuestos de C unidos a elementos metálicos e

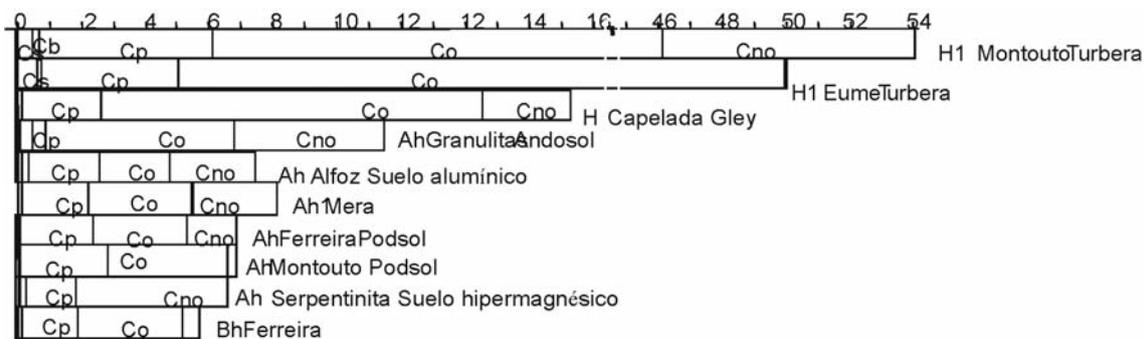
incluso a componentes minerales del suelo. El C oxidable, pero no extraíble con pirofosfato, debe atribuirse a las fracciones que ya han escapado a la actividad biológica e incluso a los procesos oxidativos normalmente existentes en los suelos ya que su intensidad en los medios edáficos es muy inferior a la existente en las condiciones del método utilizado para obtener esta fracción (oxidación en caliente con dicromato en medio sulfúrico). Finalmente, la diferencia entre el total de C obtenido por combustión y el C oxidable representa, en suelos libres de carbonatos, las formas de C tan recalcitrantes que ni siquiera son oxidadas en condiciones extremadamente forzadas como las descritas anteriormente.

Aplicado este método de fraccionamiento a diferentes tipos de suelos de Galicia se ha encontrado que hay importantes variaciones en la distribución de las formas de C según el tipo de suelo e incluso entre suelos similares (Figura 2), pero en todos los suelos aparecen formas recalcitrantes (C oxidable y C no oxidable) que deben ser consideradas como formas de elevada estabilidad que prácticamente no participan en los procesos bióticos del suelo y que, por tanto, pueden mantenerse estables durante largos períodos de tiempo.

Un estudio más preciso de la composición de estas fracciones recalcitrantes es necesario, pero muy probablemente se encuentren en ellas carbones producidos durante los incendios forestales y/o macromoléculas muy hidrofóbicas estabilizadas por procesos de polimerización o por su unión con elementos minerales (Almendros, 2002). En cambio, el contenido de C existente en la biomasa microbiana o en formas solubles es generalmente muy bajo y rara vez supera entre ambos al 3% del total de C. Estos datos parecen indicar que hay un enriquecimiento progresivo del suelo en fracciones recalcitrantes, mientras que son las formas más lábiles, y, en menor medida, las que constituyen el humus activo (asimilables al C extraído con pirofosfato), las que pueden tender a un equilibrio con las condiciones de edafogénesis y uso del suelo. Esta hipótesis parece confirmarse al analizar el contenido de C existente en la parte superficial de los suelos por encima de una profundidad datada, lo que permite determinar un índice

aproximado de la velocidad de acumulación de C. Así, en suelos ándicos y aluminicos de Galicia se han encontrado valores de acumulación en torno a $0,5 \text{ t C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para los últimos 1000 años mientras que la acumulación en suelos turberiformes e hidromorfos en el último período ha sido de unas $0,8 \text{ t C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

Como consecuencia de estos datos puede deducirse que no sólo hay que tener en cuenta la cantidad de C secuestrado sino también la forma en que lo hace ya que de ello depende su persistencia en el sumidero edáfico. El estudio de los mecanismos de estabilización de la materia orgánica, tanto la vegetal como la alóctona procedente de residuos, permitiría mejorar este aspecto que depende por una parte de la propia naturaleza de los compuestos orgánicos que llegan al suelo y, por otra, de la eficiencia de los distintos mecanismos de estabilización. En el primer caso, se sabe que la materia orgánica celulósica (la aportada principalmente en la mayoría de los cultivos) es mucho más lábil (ciclo de vida más corto en el suelo) que la materia orgánica lignificada existente en muchos sistemas forestales o de vegetación de matorral. Aún así, también hay algunos cultivos, cuyo uso habría que analizar, que pueden incrementar la cantidad de aportes con materia orgánica originalmente más recalcitrante. En el segundo caso, se están estudiando con mayor intensidad los diferentes mecanismos de estabilización de la materia orgánica que, en términos muy amplios, podríamos dividir en mecanismos físicos o estructurales y mecanismos químicos, en los que los procesos de adsorción a las superficies minerales y la complejación con diferentes elementos metálicos son los más importantes. De todas formas, sin olvidar la estabilización por ralentización de la actividad metabólica de los microorganismos que se produce en diferentes condiciones, tales como los ambientes de potencial redox intermedios (0-300 mV) o la inducción y acumulación en el suelo de formas de carbono recalcitrantes (*black carbon*) como las producidas por procesos pirolíticos, incendios de baja temperatura, etc. También se ha visto mayor estabilidad bajo algunos bosque de leguminosas asociado al N lo que podría suceder cuando la materia orgánica es rica en ligninas y pueden formarse moléculas orgánicas nitrogenadas de alta estabilidad.



Cs: C soluble; Cb: C en la biomasa microbiana; Cp: Carbono humificado = Carbono extraíble en pirofosfato-(Cb+Cs); Co: C oxidable = C oxidable con dicromato -Cp; Cno Carbono no oxidable = Carbono total-Co

Figura 1.- Formas de C (en %) en algunos suelos de Galicia (Macías et al., 2001).

5.- Se puede incrementar la fijación de C en el suelo incrementando la cantidad de C residual de la biomasa e incrementando la eficiencia de los mecanismos de estabilización de la materia orgánica.

Para conseguir incrementar el C orgánico aportado por la vegetación es necesario mejorar uno o varios de los siguientes aspectos: la fertilidad del suelo y la eficiencia fotosintética del cultivo, cambiando de especie hacia una planta más productiva (por ejemplo plantas C4) o modificando el sistema de producción en alguna de sus partes. Algunas de estas actuaciones ya se han ensayado, demostrándose que el incremento de materia orgánica en la biomasa producida influye en el C incorporado al suelo (Gil et al. 2000). Así, en ensayos realizados en la escombrera en vías de recuperación de la mina de As Pontes se han contabilizado incrementos de C en el suelo que superan las 15 t C ha⁻¹año⁻¹ cuando se utilizan sistemas de producción de *E. globulus* de alta densidad con marcos de plantación de 0,5 x 0,5 m (Foto 2). Además, estos ensayos han puesto de manifiesto que en estas condiciones se incrementa muy fuertemente la producción de biomasa y, como consecuencia, la de C fijado en la misma alcanzando valores que llegan a triplicar en suelos de escombreras de mina los rendimientos obtenidos con los métodos tradicionales (marcos de 3 x 2 m y turnos de más de 15 años) en las mejores condiciones (Tabla 6). Esto abre unas interesantes perspectivas para los cultivos de biomasa, especialmente de plantas de elevada productividad como *Eucalyptus*, *Robinia*, *Miscanthus*, *Acacia*, *Cytisus*, (ver Foto 2)... o cultivos de maíz dulce, sorgo dulce, cardo, kenaf, etc....

Por otra parte, ensayos realizados en diferentes lugares del mundo, pero principalmente en Brasil, Argentina, EEUU y Australia han demostrado que se puede incrementar tanto el

C fijado en la biomasa como el secuestrado en el suelo mediante diferentes técnicas de manejo del suelo tales como la siembra directa, el cultivo sin laboreo o con laboreo mínimo (Robert, 2001), las rotaciones de cultivo con la introducción de un cultivo sin cosecha y las que presentan un cultivo, como el maíz el sorgo o el trigo, que dejan grandes cantidades de residuos repetido o más frecuente dentro de la rotación, etc. Un ejemplo son los resultados obtenidos por Sá (2004) que en ensayos de cultivo con siembra directa, realizados desde hace 25 años en el entorno de Punta Grossa (Paraná, Brasil) observó que el contenido de C en el suelo había descendido desde 2,6% en 1910 a 1,4% como consecuencia del cultivo convencional y que la introducción del cultivo con laboreo mínimo y siembra directa (ver Foto 1) no sólo habían frenado la curva descendente sino que desde 1990 había subido hasta 1,8% con incrementos que rondaban 1 t C ha⁻¹año⁻¹ (Sá, 2005).

Obviamente existen grandes diferencias de productividad según la fertilidad, frugalidad de las plantas, su eficiencia fotosintética y la duración de su periodo activo. Así, cálculos realizados utilizando la metodología propuesta por el Protocolo de Kyoto para el C fijado en diferentes sistemas forestales de Galicia permiten comprobar que el *E. globulus* es la especie forestal de mayor eficiencia como sumidero seguida del *Pinus pinaster* (Tabla 7).

Estos datos referidos al año 2000 (los cálculos actuales nos llevarían a cifras próximas a 1,8 M t C) confirman la extraordinaria importancia que presenta el eucalipto como sumidero válido para el Protocolo de Kyoto tanto en plantaciones convencionales (si bien contingentado por el Artículo 3.4.) como en cultivos de biomasa de corta duración.

Especie	Marco plantación (m)	Producción global cosechada (t ha ⁻¹)	Fijación de C cosecha (t C ha ⁻¹)	Fijación anual cosecha (t C ha ⁻¹ a ⁻¹)	Fijación anual total (t C ha ⁻¹ a ⁻¹)
SUELO DE ESCOMBRERA					
<i>Acacia dealbata</i>	1x1	33,9	15,5	6,2	9,3
<i>A. melanoxylum</i>	1x1	39,1	17,6	7,1	10,7
<i>E. globulus</i>	1x1,5	24,3	11,0	4,4	6,6
<i>E. globulus</i>	1x1	39,2	17,8	7,1	10,7
<i>E. globulus</i>	1x0,5	93,2	42,2	16,9	25,4
<i>Ulex europaeus</i>		31,0	14,4	5,8	8,7
<i>Cytisus scoparius</i>		22,0	10,1	4,0	6,0
SUELO NATURAL					
<i>A. dealbata</i>	1x1	34,6	15,8	6,3	9,5
<i>A. melanoxylum</i>	1x1	36,5	16,5	6,6	9,9
<i>E. globulus</i>	1x1,5	36,0	16,3	6,5	9,8
<i>E. globulus</i>	1x1	36,1	16,4	6,5	9,8
<i>E. globulus</i>	1x0,5	123,3	55,8	22,3	33,5

Tabla 6.- Comparación de la Capacidad de fijación de C en la biomasa de ciertas especies según tipos manejo en suelos de la mina de As Pontes y en suelos naturales del entorno bajo las mismas condiciones climáticas.

Especie forestal	tC secuestradas	% del total	Superficie (*)	Eficiencia (tC/ha/año)
<i>Eucalyptus. globulus</i>	1.181.421	67%	229.970	5,14
<i>Pinus pinaster</i>	450.041	25%	284.332	1,58
<i>Pinus radiata</i>	86.066	7%	77.412	1,11
<i>Castanea sativa</i>	49.030	4%	94.384	0,52

Tabla 7.- Capacidad de secuestro de C en la biomasa forestal de plantaciones gallegas convencionales referida al año 2000 y a las condiciones del Artículo 3.4 del Protocolo de Kyoto (Macías & Rodríguez Lado, 2003). (*) Los datos de superficie se refieren a la superficie incrementada desde 1990 al 2000 según los datos digitalizados del IFN3 e IFN2 (Inventario Forestal Nacional). En el caso del eucalipto se han sumado también las superficies implicadas en procesos de tala, lo que puede dar lugar a un exceso de superficie considerada que implicaría una mayor eficiencia.



Foto 1.- Ensayo de cultivo de soja mediante siembra directa en Ponta Grossa (Paraná-Brasil) (Foto de Joao Carlos de Moraes Sá).



Foto 2.- Ensayos de diferentes cultivos de biomasa en los suelos de las escombreras de la mina de lignitos de As Pontes. Los resultados se encuentran sintetizados en la Tabla 6.



Foto 3.- Ensayos de recuperación de suelos de escombrera de la mina Touro mediante la adición de residuos alóctonos para la elaboración de "suelos artificiales". Se aprecian residuos de cenizas de combustión de biomasa, lodos de depuradora ricos en celulosa y conchas de mejillón.

Finalmente, otros aspectos a considerar dentro de un proceso de optimización, serían los referentes a la calidad del C fijado, es decir su labilidad o recalcitrancia, lo que nos llevaría a preferir, en igualdad de condiciones productivas, plantas ricas en aportes ricos en lignina. Asimismo, los ciclos de vida de los productos obtenidos a partir de las cosechas forestales deben ser calculados y prolongados en lo posible.

6.- La Recuperación de suelos degradados mediante la instalación de cultivos de biomasa con vegetación frugal y pionera o sistemas forestales es una de las actuaciones prioritarias.

Los importantes efectos positivos de los procesos de recuperación de suelos degradados ya se han podido comprobar con la evolución de la calidad del agua y el suelo, el paisaje y la biodiversidad en escombreras como las de las minas de As Pontes, Touro, Meirama, etc. Asimismo, es importante tener en cuenta que la revegetación está incluida en el Artículo 3.4, del Protocolo y, por tanto, los secuestros de C en estos sumideros son contabilizables neto-neto.

7.- Impedir la erosión y los incendios favoreciendo el desarrollo e incremento de espesor de los horizontes humíferos del suelo, es una de las medidas más eficientes puesto que un incremento de 1 cm en el espesor de Leptosoles y Regosoles de fase somera representa unos 60 Tg C y un incremento de 1 cm en toda la superficie de Galicia daría cifras superiores a los 15 millones de tC secuestradas que, si bien no serían contabilizadas en el desarrollo actual del Protocolo durante el primer período de compromiso, existen importantes expectativas de que sí lo sea en el segundo (a partir del 2012) al haber sido incluida en la Estrategia de Protección del Suelo de Europa la pérdida de materia orgánica, como una de las principales

amenazas de degradación del suelo, y su corrección, como una de las principales medidas de recuperación en la Directiva en fase de elaboración.

8.- Añadir residuos orgánicos adecuados a los suelos.

Especialmente residuos propios del sistema productivo (como los restos de cortas en explotaciones forestales o la paja en los cultivos) o bien alóctonos que contengan formas estabilizadas de C o que evolucionen en esta línea en contacto con otros aditivos o con los componentes del suelo. De todas formas, esta actividad, muy positiva para el suelo y para la gestión de los residuos, debe ser bien controlada y regulada para evitar la introducción de contaminantes en los sistemas edáficos o en los medios hídricos y bióticos. La utilización de los denominados "suelos artificiales" o "suelos derivados de residuos", actualmente en estudio por diferentes investigadores es una importante alternativa por sus múltiples efectos ambientales positivos (Macías, 2004)

9.- Incrementar la investigación y el estudio de la dinámica de los compuestos orgánicos en el suelo.

Finalmente, es necesario incrementar el estudio del funcionamiento de la materia orgánica de los suelos y la influencia que todos los sistemas de utilización antrópica producen en las variaciones de cantidad y calidad de la materia orgánica. Asimismo, deben establecerse normas de protección que eviten la eliminación o degradación de los suelos con alta capacidad de retención de C.

Conclusión

La utilización de los Suelos y la Biomasa como sumideros de C es una realidad admitida por la mayor parte de los investigadores, aunque todavía no se hayan incluido todos

los procesos de secuestro existentes en los diferentes sistemas o tipos de utilización del suelo en los balances admitidos para el Primer período de compromiso del Protocolo de Kioto. Sin embargo, y tal como señalaba Robert (2001) en su informe a la FAO, el secuestro de C en suelos es una estrategia "win-win" en la que todos son beneficios ambientales, pues, el incremento de C mejora la calidad del suelo, incrementa la estabilidad de los agregados y la resistencia a la erosión, aumenta la capacidad de retención de agua y nutrientes, la actividad biológica y la biodiversidad de los organismos del suelo, así como la resistencia de los suelos frente a los contaminantes a los que mitiga en su toxicidad o incluso conduce a su degradación por intermedio de los procesos metabólicos. Por ello, esta nueva visión del suelo, con importantes funciones ambientales de filtro, sumidero, control de los ciclos biogeoquímicos y protector de la calidad del agua, la biota y la salud humana, reconocidos en la Estrategia Europea de Protección del Suelo, exige un incremento del contenido de C en el reservorio edáfico especialmente importante en los medios en los que se ha minorizado por acciones humanas. Este incremento, que no era tan necesario desde la consideración única de los procesos productivos, debe llevarse a cabo con independencia de que se contabilice o no el C fijado y se pague al precio propuesto para la UDA en el mercado de emisiones que sería lo correcto pues la tonelada de CO₂ emitida es exactamente igual que la tonelada de CO₂ secuestrada.

Bibliografía

Academie des Sciences (2000). Conséquences scientifiques, juridiques et économiques du Protocole de Kyoto. Rapport N°45. Institut de France. TEC & DOC, Paris.

Almendros, G. (2002). Investigaciones básicas sobre el origen y la estructura molecular de las formas estables de la materia orgánica relacionadas con el proceso de secuestro de carbono. En: Macías & Camps Arbestain. Actas de la Reunión Internacional de Secuestro de Carbono en Suelos y Biomasa (eds.). Castelo de Santa Cruz. A Coruña, Spain.

Batjes, N.H. (1999). Management options for reducing CO₂ concentrations in the atmosphere by increasing carbon sequestration in the soil. ISRIC. Wageningen, The Netherlands.

Eswaran, H., Van den Berg, E., Reich, P., & Kimble, J. (1995). Global soil carbon resources. En : R. Lal et al (Eds.): Soils and Global Change. CRC Lewis Publishers. Boca Raton, FL, 27-43.

Gil, A., Monterroso, C. & Macias, F. (2000). Revegetation of mine soils with energetic crops: Implications for carbon fixation in soil and biomass. Proceedings of 1st World Conference on Biomass for Energy and Industry. Sevilla. 381-383

Houghton, R.A. Hackler, J.L. & Lawrence, D.S. (1999). The U.S. carbon budget: contribution from land-use change. *Science* 285:574-577.

Lal, R., Kimble, J.M., Levine, E., Stewart, B.A. (Eds.). (1995). Soils and Global change. CRC & Lewis. Boca Raton.

Lal, R., Kimble, J.M., Follet, R.F & Cole, C.V. (1998). The potential of U.S. Cropland to Sequester Carbon and Mitigate the Greenhouse Effect. Ann Arbor Press, Chelsea, MI.

Lal, R., Kimble, J.M., Follet, R.F. & Stewart, B.A. (Eds.). (1998). Soil processes and the carbon cycle. Adv. In Soil Science, CRC Press.

Lal, R., Kimble, J.M. & Follet, R.F. (Eds.).(1998). Management of Carbon sequestration in soil. CRC Press.

Lal, R. (1999). Global carbon pools and fluxes and the impact of agricultural intensification and judicious land use. En: Prevention of land degradation, enhancement of carbon sequestration and conservation of biodiversity through land use change and sustainable land management with a focus on Latin America and the Caribbean. World Soil resources Report 86. FAO. Rome, p: 45-52.

Lal, R. (2000). World cropland soils as a source or sink for atmospheric carbon. *Advances in Agronomy*, 71: 145-191.

Lal, R. (2001). Soil Carbon Sequestration and the Greenhouse effect. SSSA Special publications number 57.

Macias, 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 subtropicaux humides. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 315, Série II, 1803-1810.

Macias, F. et al. (1999). Informe final del proyecto "Procesos de fijación de carbono en sistemas superficiales del Noroeste de España. Elaboración de estrategias de reducción del CO₂ atmosférico a través del suelo y la biomasa. CICYT.

Macias, F. & Calvo de Anta, R. (2001). Los suelos de Galicia. En: Sociedade para o Desenvolvemento Comarcal de Galicia. (Ed). Atlas de Galicia. Consellería de Presidencia. Xunta de Galicia, Santiago de Compostela. Tomo 1: Medio Natural: 173-217.

Macias, F. (2002). Capacidad de secuestro de carbono en suelos y biomasa de Galicia. En: Macías, F. & Camps, M.(Eds) Actas de la Reunión Internacional de Secuestro de Carbono en Suelos y Biomasa. Castelo de Santa Cruz. A Coruña, Spain.

Macias, F. & Rodríguez Lado, L., (2003). Primera aproximación al cálculo de los sumideros de C en sistemas forestales y suelos de Galicia de acuerdo con el protocolo de Kyoto. Informe interno Consellería de Medio Ambiente. Xunta de Galicia, Santiago de Compostela.

Macias, F. (2004). Recuperación de suelos degradados, reutilización de residuos y secuestro de Carbono. Una alternativa integral de mejora de la calidad ambiental. Actas de Residua 2004. VII Conferencia sobre Gestión de Residuos. Santiago de Compostela.

- Macias, F. & Camps Arbestain, M. (2005). Suelo y Cambio climático: Capacidad de fijación de carbono en sistemas edáficos. En: "Protección del Suelo y el Desarrollo Sostenible". IGME, Serie Medio Ambiente, Nº 6. 179-188. Madrid
- Macias, F., Camps Arbestain, M. & Rodríguez Lado, L. (2005). Formes du Carbone et séquestration dans les milieux édaphiques de Galicia. Rélation avec la lithologie, les processus pédologiques et les types d'utilisation des sols. En Journées d'hommage à Michel Robert. Versailles. Francia. *Gestión du Sol* (en prensa).
- Parkyn, L., Stoneman, R.E. & Ingram, H.A.P. (Eds.). (1997). *Conserving Peatland*. CAB International. Wallingford.
- Pérez Varela, S. (2002). Fraccionamiento de Carbono orgánico del suelo en áreas restauradas de la mina de lignitos de As Pontes. Tesis Licenciatura. Fac. Química. Univ. Santiago de Compostela.
- Robert, M. (2001). Soil carbon sequestration for improvement land management. FAO. World Soil Resources Report nº 96. Rome.
- Sá, J.C.M. et al. (2004). O plantio direto como base do sistema de produção visando o seqüestro de carbono. *Revista Plantio Direto*, 45-61.
- Sá, J.C.M. (2005). Comunicación personal.
- Smith, P., Powlson, D.S., Glendenning, A.J. & Smith, J.U. (1996). The chemistry and nature of protected carbon in soil. *Australian Journal of Soil Research* 34: 251-271.
- Smith, K.A. (1999). After the Kyoto Protocol: can soil scientist make a useful contribution. *Soil Use and Management* 15: 71-75.
- Sombroeck, W.G., Nachtergale, F.O. & Hebel, A. (1993). Amounts, dynamics and sequestering of carbon in tropical and subtropical soils. *Ambio* 22: 417-426.
- Verde, R., Camps Arbestain, M. & Macias, F. (2005). Expresión of andic properties in soils from Galicia (NW Spain) Under forest and agricultural use. *European Journal of Soil Science*, 56: 53-63.