

LAS TURBERAS DE MONTAÑA DE GALICIA COMO SUMIDEROS DE CARBONO

PONTEVEDRA POMBAL¹, A., MARTÍNEZ CORTIZAS¹, A.; P. BUURMAN²

¹Departamento de Edafología e Química Agrícola. Facultade de Bioloxía. Universidade de Santiago de Compostela. Campus Sur s/n. 15782 Santiago de Compostela. Galicia. España. e-mail: edpombal@usc.es

²Department of Environmental Sciences, University of Wageningen, The Netherlands

Abstract. Mountain peat bogs of Galicia (NW Spain) as carbon sinks

Due to its ability to accumulate atmospheric carbon and to the proportion of the Earth surface they occupy, a 3% of continental lands, peatlands are an important carbon reservoir and thus have a high potential to influence the greenhouse effect and the global climate. In Galicia (NW Spain) there are some 10,000 ha of mountain peatlands in which we estimate there are accumulated 10-16 106 t C. This represents a 4.7-7.5% of the carbon stored in forests biomass in Spain, and a 24-38% of the carbon stored in forests biomass and up to 6% of the carbon stored in the soils of Galicia. This numbers give a good insight into the importance of peat forming ecosystems on the C cycle in the region.

Within the peat deposits, C shows a rapid increase in the superficial layers (25-60 cm) and a slow increase downwards. Nitrogen shows an opposite trend, thus C/N ratios increase with the depth/age of the peat, in contrast with the usual decrease that occurs in well aerated, mineral soils. The intensity in the change of the C/N ratio seems to be related with local factors, as for example the climatic conditions and their effect on peatland hydrology. Peatlands located at lower altitude have higher C/N ratios than those located at higher altitude. Carbon concentrations follow the opposite trend of peat bulk density, supporting the conclusion that mass loss due to the decomposition of the organic matter is implied in the relative enrichment in carbon.

CPMAS ¹³C-NMR analysis of the peat revealed the presence of aliphatic, methoxylic, hydroxylic, acetalic, aromatic and carboxylic C functional groups. Carbohydrates (hydroxylic and acetalic groups) and aliphatics are the main components, with average proportions of 36.6% and 29.5% respectively. With increasing depth/age the proportion of carbohydrates decreases while aliphatic and aromatic carbon increase. As a result, the proportion of carbohydrate-C is negatively correlated to C concentration ($r = -0.86$), but aromatic-C and aliphatic-C show a positive correlation ($r = 0.78$ and 0.63 , respectively). It seems though that the increase in C concentration during peat decomposition occurs by the selective preservation and/or diagenesis of constituents enriched in carbon.

Key words: Peatlands, Histosols, Carbon storage, Organic matter decomposition, ¹³C NMR studies, Galicia (NW Spain)

Resumen. Dada su capacidad para acumular carbono y la extensión que ocupan, del orden del 3% de la superficie de tierras emergidas, las turberas representan un importante reservorio para este elemento, y por ello tienen un elevado potencial para intervenir en el efecto invernadero y el clima global. En Galicia se han inventariado hasta la fecha unas 10.000 ha de turberas de montaña, que han acumulado 10-16 106 t C. Esto representa un 4.7-7.5% del C total que se estima en forma de biomasa forestal en España, un 24-38% del almacenado en la biomasa forestal de Galicia y alrededor del 6% del C acumulado en los suelos de nuestra Comunidad Autónoma. Estas cifras dan una buena idea de la importancia de los sistemas formadores de turba en el ciclo del C en el área.

Por lo que se refiere a su distribución vertical, el C muestra una rápida acumulación en los niveles superficiales (25-60 cm) de la turberas ombrotóricas y un lento incremento hacia los más profundos. El N presenta una tendencia opuesta. Por ello las relaciones C/N, al contrario de lo que ocurre en los suelos inorgánicos bien aireados, aumentan con la edad/profundidad. La intensidad del cambio en la relación C/N parece estar

bien aireados, aumentan con la edad/profundidad. La intensidad del cambio en la relación C/N parece estar relacionada con factores locales, como las condiciones climáticas y su efecto sobre el comportamiento hidrológico de la turbera. Las turberas ubicadas a menor elevación presentan relaciones C/N superiores a las ubicadas a mayor elevación. Igualmente, la concentración de C sigue una tendencia opuesta a la densidad de la turba, reforzando la conclusión de que la pérdida de masa por descomposición de los restos vegetales está implicada en el enriquecimiento relativo en C.

El estudio por CPMAS ^{13}C -NMR de la turba revela la presencia de grupos funcionales de carbono alifático, metoxilo, hidroxilo, acetal, aromático, fenólico y carboxílico. Los carbohidratos (hidroxilos y acetales) y los alifáticos son los componentes mayoritarios, con valores medios de 36.6% y 29.5% respectivamente. Con la edad la turba se empobrece en carbohidratos y se enriquece en C alifático y aromático. Debido a esto, los carbohidratos presentan una correlación negativa con la concentración de C (-0.86), mientras que los grupos aromáticos y alifáticos muestran una correlación positiva (0.78 y 0.63 respectivamente). Parece pues que, en las turberas, tiene lugar una preservación selectiva y/o diagénesis de constituyentes con mayor contenido de C que el material original, a medida que éste se descompone.

Palabras clave: Turberas, Histosoles, acumulación de carbono, descomposición de la materia orgánica, estudios de ^{13}C RMN, Galicia

INTRODUCCIÓN

El suelo es el segundo reservorio de carbono más importante después de los océanos. A escala planetaria, el medio edáfico contiene aproximadamente 1300 Pg de carbono, la vegetación apenas alcanza los 550 Pg y la atmósfera no supera los 750 Pg (Johnson *et al.*, 1995). De este reservorio edáfico, las turberas son el principal almacén terrestre. En las latitudes templadas y la zona boreal del hemisferio norte las turberas, formadas en su mayor parte después de la última deglaciación, suponen un reservorio total de 329 a 528 10^{12} t C (Immirzi *et al.*, 1992). Durante el actual interglacial la tasa media de acumulación de turba es de 90 a $110 \cdot 10^6$ t a^{-1} (Gorham, 1991). Esto implica que entre un 5 y un 10% de la biomasa vegetal producida anualmente se acumula en forma de turba y, por lo tanto, no retorna al ciclo de nutrientes (Warner *et al.*, 1993). Las turberas son pues acumuladores naturales netos de materia orgánica, donde la mayoría del C es potencialmente asimilable por mecanismos de intercambio con la atmósfera y su impacto sobre el efecto invernadero y el clima podría ser considerable (Franzen *et al.*, 1996). Los cambios globales, a su vez, afectan a las variables ambientales que actúan en la regulación de los flujos entre ambos sistemas (atmósfera y edafosfera). Para

poder predecir el resultado de los diversos escenarios medioambientales que se manejan en relación a los cambios globales (p.ej. cambio climático), es necesario comprender los procesos que intervienen en la fijación y liberación del C, sus variaciones a largo plazo y su respuesta al control climático.

Las turberas, a pesar de ocupar un área relativamente pequeña de la superficie terrestre (3% de las tierras emergidas), procesan y transfieren a la atmósfera cantidades globalmente significativas de CO_2 , CH_4 , H_2S (Adams *et al.*, 1981) y N_2O (Buresh *et al.*, 1980). Por ejemplo, Hogg *et al.* (1992) indican que las turberas del hemisferio norte pueden contener una cantidad de carbono equivalente a 100 años de emisiones atmosféricas de CO_2 antropogénico y son por tanto un sumidero eficaz de C. No obstante, también pueden transformarse en fuentes potenciales de CO_2 y CH_4 si se desestabiliza alguno de los factores implicados en su desarrollo y en ese caso, debido a la cantidad de carbono acumulado en ellas, el impacto potencial sobre el efecto invernadero y el cambio climático sería determinante. Por lo tanto, la elaboración de predicciones realistas respecto a los flujos de carbono desde las turberas hacia la atmósfera debidas al cambio climático precisan de la comprensión de los factores que controlan los procesos de acumu-

lación de turba.

Teniendo como meta, entre otros, este objetivo, en los últimos años hemos venido estudiando la composición y evolución de la turba en suelos orgánicos de Galicia (Fig. 1). En el NW ibérico existen al menos 10.000 ha de turberas de montaña, que se han formado fundamentalmente durante el Holoceno (Martínez Cortizas *et al.*, 2001) y que llevan, por tanto,

unos 10.000 años acumulando CO₂ atmosférico en forma de turba. En este trabajo se describen sucintamente algunos aspectos sobre la acumulación de C y N, el grado de evolución de la turba (C/N), la relación entre la evolución de la masa y la acumulación de carbono y los cambios en los principales grupos funcionales de C (mediante ¹³C RMN) con la profundidad/edad de la turba.

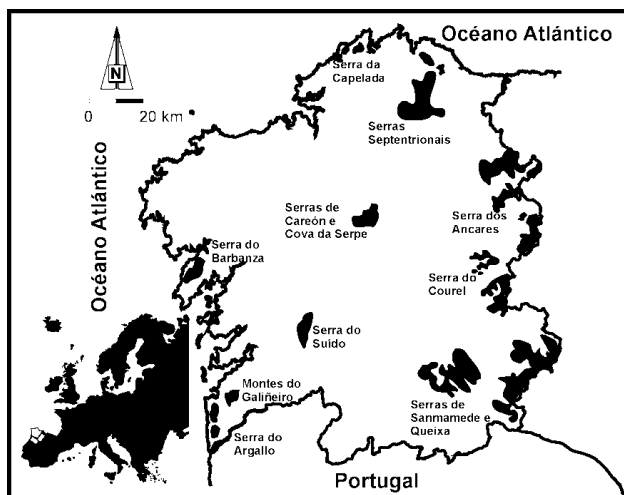


FIGURA 1. Localización de los principales sectores de distribución de turberas en Galicia (Pontevedra-Pombal, 2002).

ELEMENTOS BIÓFILOS Y GRADO DE DESCOMPOSICIÓN DE LA TURBA

La biomasa anual producida en una turbera excede ampliamente a la producción anual de turba, puesto que los procesos de formación van asociados a la pérdida de materia orgánica y por tanto de C y N. La mayor parte de las transformaciones ocurren en el *acrotelm* (el nivel superficial, poroso, en condiciones oxidantes que se extiende hasta donde desciende el nivel freático en verano). En el *catotelm* (el nivel de turba, de mayor espesor, donde las condiciones reductoras son permanentes) la descomposición es lenta y el C se pierde esencialmente por medio de la difusión del CH₄ generado por la metanogénesis. Todos los estudios indican la existencia de dos condicio-

nantes principales en el comportamiento del C y del N en los ecosistemas de turbera, la descomposición de la turba y la naturaleza biogeoquímica de la turbera (Naucke *et al.*, 1993). En el caso de las turberas del noroeste peninsular, entre el 80 y el 98% del C y N totales está formando parte de la materia orgánica, pero sus variaciones con la profundidad/edad de la turba son contrapuestas.

Carbono

En términos generales, las secciones ombrotórficas de las turberas de Galicia presentan un valor medio de carbono de 52.4 ± 3.5% y una moda de 53.2%. La tasa media de acumulación de carbono es de 31.1 ± 11.0 g C m⁻² a⁻¹ (Pontevedra-Pombal, 2002) por lo que, dado el área que cubren, en Galicia se acumulan anual-

mente algo más de 3.000 t de C. En cuanto al reservorio actual, teniendo en cuenta la superficie ya mencionada, el valor medio de carbono, la densidad media de la turba (0.15 Mg m^{-3}) y la profundidad media (2 m), estimamos que en las turberas de Galicia hay acumuladas $10\text{-}16 \cdot 10^6 \text{ t}$ de C. A título comparativo, esto representaría un 4.7-7.5% del carbono total de la biomasa forestal en España, y entre un 24-38% del C de la biomasa forestal de Galicia –estimada en $42 \cdot 10^6 \text{ t C}$ a partir del Tercer Inventario Forestal (Rodríguez Lado, com. pers.). Por lo que respecta al C acumulado en los suelos, Macías (2002) estima que los suelos de Galicia contienen $2.8\text{-}6.2 \cdot 10^8 \text{ t C}$, por lo que las turberas de montaña podrían representar del orden del 6% del reservorio edáfico de C en Galicia. Estos valores ponen de relieve el importante papel que juega una superficie tan pequeña en el contexto autonómico y nacional en lo referente al carbono.

En las turberas el carbono muestra un nítido proceso de acumulación hacia los niveles más profundos/antiguos. Tal como puede verse

en la Fig. 2 esta acumulación ocurre en dos etapas: en los niveles superficiales de la turbera (*acrotelm*), donde la descomposición de la materia orgánica es más intensa, la concentración de C aumenta bruscamente con la profundidad y a partir de ahí lo hace de manera mucho menos marcada (en el *catotelm*). La tasa de aumento de la concentración de C y la profundidad a la cual ocurre el cambio de tasa parecen depender de factores locales. Así, en las turberas situadas a baja elevación (BCG a 600 m, Fig. 2) el incremento de la concentración de C en el acrotelm es 9 veces superior a la del catotelm, mientras que en las ubicadas a mayor elevación (PDC a 1000 m, Fig. 2) esta relación es de 3. No obstante, a escalas de miles de años parece darse una tendencia convergente hacia una concentración de C próxima al 60%.

El incremento de C parece pues asociado al incremento de la descomposición, a la pérdida de masa y a la preservación de compuestos ricos en C. En turberas ombrotáficas de Suecia se obtuvieron valores medios de carbono de 46-48% en superficie, aumentando

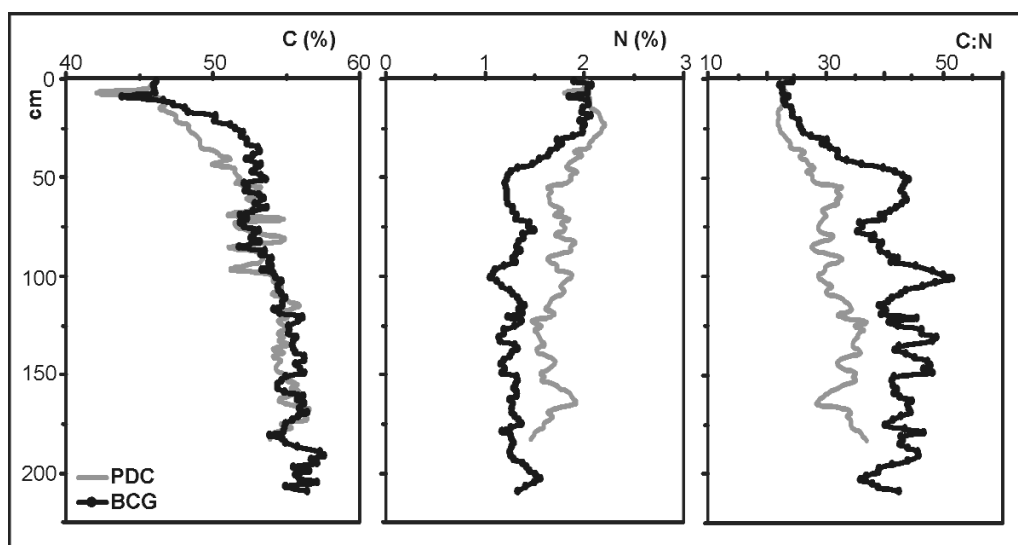


FIGURA 2. Contenido y distribución en profundidad del carbono y nitrógeno totales, en porcentaje, y de las relaciones C/N en dos testigos de turberas ombrotáficas de Galicia (PDC: Pena da Cadela; BCG: Borralleras da Cal Grande).

hacia la transición acrotelm–catotelm, donde alcanzan un porcentaje del 55% (Malmer y Wallen, 1996), similar al obtenido en las turberas ombrotóricas estudiadas por nosotros. Sin embargo, la cinética de acumulación del carbono hasta alcanzar el nivel de estabilización varía entre turberas, asociada al espesor del acrotelm.

Nitrógeno

Por lo que respecta al N, las secciones ombrotóricas de las turberas presentan valores medios de $1,58 \pm 0,28\%$ y una moda de $1,28\%$. En este tipo de turberas la dinámica en profundidad del N es inversa a la del C (Fig. 2), observándose un empobrecimiento en los niveles más profundos y con mayor grado de descomposición. Estos resultados no sólo son comparables en el aspecto cuantitativo a los recogidos en otras investigaciones, sino que también lo son respecto a su distribución vertical. En estudios llevados a cabo en Escandinavia, Australia, Nueva Zelanda, Estados Unidos y Canadá (Damman, 1988), se encontró que las turberas ombrotóricas oceánicas presentan concentraciones de N que aumentan paulatinamente en los 30-50 cm primeros centímetros, coincidiendo con la zona de fluctuación por encima del nivel freático. Lo cual se debe al lixiviado de N desde las capas superiores bien drenadas. A partir de esta profundidad se da un descenso suave o un mantenimiento de los niveles. Aunque se ha sugerido que los niveles ombrotóricos de las turberas pueden jugar un importante papel en la actividad fijadora total de nitrógeno dentro de un complejo turboso (Chapman y Hemond, 1982), apoyándose en la existencia de actividad nitrogenasa a $\text{pH} < 4$ (Waughman y Bellamy, 1980), es evidente que existe una pérdida de N durante la evolución de la turba cuya intensidad dependerá de las condiciones hidrogeoquímicas de la turbera y de la naturaleza bioquímica de los restos vegetales.

En concreto, en las turberas ombrotóricas estudiadas por nosotros el N aumenta ligeramente en los primeros centímetros del

acrotelm para luego descender en profundidad -asociado a los procesos de descomposición- hasta el catotelm, donde se produce una lenta estabilización de los niveles de nitrógeno (Fig. 2). Estos resultados son similares a los descritos para este tipo de turberas en el oeste de Finlandia, en perfiles cortos de turba (60-65 cm). En estos estudios se encontró que inicialmente el N disminuye en la superficie para sufrir luego un incremento paulatino entre 20 y 65 cm (Hemond, 1983; Damman *et al.*, 1993). Iguales resultados se obtuvieron en testigos largos por Updegraff *et al.* (1995), con valores de N de 1,3% en superficie y un 1,7% a un metro de profundidad.

Este hecho parece deberse a la mayor capacidad de inmovilización de N por los microorganismos en los niveles profundos de la turbera, aunque algunos autores adjudican parte de este efecto a los procesos de metanogénesis. Según King *et al.* (1990) el CH_4 producido en el interior del suelo orgánico entra en contacto con las zonas superficiales más o menos oxigenadas, durante su liberación, consumiéndose por oxidación entre un 11% y un 90%. Como consecuencia de este proceso podría operar un mecanismo de co-oxidación de amonio a nitrato mediado por bacterias metanotróficas, que daría lugar a un incremento atípico del N total en el perfil de turba (Harris y Hanson, 1980).

El resultado final observado en las turberas ombrotóricas de Galicia, en coincidencia con las de otras regiones biogeográficas, es que durante la evolución de la materia orgánica se produce un enriquecimiento relativo de C y una merma del contenido en N, especialmente significativo en el acrotelm.

Descomposición y relaciones C/N

Parte de la materia orgánica es utilizada por asimilación por los microorganismos para generar nuevos tejidos y otra parte es oxidada en la disimilación para obtener energía. El concepto de descomposición de la materia orgánica se refiere, estrictamente hablando, a la

disimilación (Janssen, 1996). La descomposición engloba un gran número de procesos: pérdida de materia orgánica por lixiviado, degradación microbiana o liberación por la edafofauna; alteraciones de la estructura física y cambios en los componentes químicos.

En cuanto a las transformaciones que provoca la formación de turba a partir de restos vegetales, existen dos procesos que ocurren simultáneamente: la humificación y la mineralización. Ahora bien, debido a que el resultado de la mineralización de la turba es temporalmente imperceptible, lo que se identifica como grado de descomposición hace realmente alusión a la proporción relativa de sustancias húmicas producidas respecto a los residuos tisulares, por lo que correctamente debería ser denominado como grado de humificación. Si bien el uso científico ha fijado y aceptado como válido el término de grado de descomposición de la turba.

La mayoría de los cambios que se producen en el grado de descomposición se dan en el acrotelm, y están gobernados por las condiciones ambientales reinantes cuando se produce la incorporación del material vegetal al suelo y por el nivel y dinámica de la capa freática. En consecuencia, la evolución del contenido relativo de C y N orgánico está condicionada por la evolución del suelo y la magnitud del nivel de equilibrio entre las interacciones de los factores de formación.

Los histosoles contienen restos vegetales en varios estados de biodegradación, dando lugar a un sistema complejo que no puede ser caracterizado fácilmente por medios físicos o químicos. Los criterios utilizados para evaluar la descomposición de la turba se basan en medidas del efecto o de los productos de la descomposición, pero como los distintos componentes de la turba no tienen la misma cinética, los resultados tienen limitaciones en cuanto a la interpretación. El índice de evolución más ampliamente utilizado es la relación C/N (Kuhry y Vitt, 1996).

En las turberas ombrotáficas que hemos investigado se observaron relaciones medias C/N del orden de 34 con un valor modal de 32. Estas relaciones son del mismo rango (30-35) que las obtenidas para este tipo de turberas en Suecia (Malmer *et al.*, 1997) o de manera más general para turberas ombrotáficas del hemisferio norte (Updegraff *et al.*, 1995). Las altas relaciones C/N medias de las turberas ombrotáficas se han achacado a la baja actividad microbiana en las turbas ricas en *Sphagnum*, a causa de la resistencia a la descomposición que opone este material y a la falta de energía de fácil asimilación (Martin y Holding, 1978). Por otro lado, esto también se ha relacionado con las deficiencias nutricionales de las turbas ombrotáficas (Damman, 1978), y con la existencia de inhibidores químicos (Kalviäinen y Karunen, 1984). En cualquier caso, el resultado final sería la falta de degradación biótica de la materia orgánica

Junto con el alto valor de la relación C/N, otro aspecto destacable en las turberas del noroeste ibérico es el aumento de la relación con la profundidad (Fig. 2). Esta evolución es opuesta a la encontrada en turberas del norte de Canadá (Kuhry y Vitt, 1996). Teniendo en cuenta la interpretación edafológica al uso para suelos minerales aerobios, los valores obtenidos en la turba indicarían una materia orgánica poco descompuesta y un descenso del grado de evolución con el incremento de la profundidad. Ahora bien, en las turberas de Galicia los valores altos de la relación C/N aparecen en niveles de turba de mayor edad y más evolucionada que aquellos con valores más bajos. Obviamente el incremento de la relación con la profundidad es consecuencia del enriquecimiento relativo en C durante la descomposición de la turba. Además, en los dos ejemplos mostrados en la Fig. 2 si bien en la superficie las relaciones C/N son similares, tanto en la mayor parte del acrotelm como en el catotelm dichas relaciones son más altas en la turbera situada a menor elevación (600 m) que en la que se en-

cuentra a mayor altitud (1000 m). Dado el intenso gradiente de temperatura en el área en que se encuentran (Martínez Cortizas et al., 1999), la temperatura media anual en la actualidad es del orden de 2.5 a 3 °C mayor a 600 m que a 1000 m, por lo que cabe esperar que el grado de descomposición de la materia orgánica sea superior a menor elevación.

Otra evidencia destacable es la correlación de signo negativo observada entre la relación C/N y el contenido en fibras desmenuzables (Pontevedra Pombal, 2002). Por otro lado, como ya se ha mencionado, las turberas ombrotóricas que hemos estudiado muestran un incremento de la acumulación de carbono y, como se mencionará más adelante, una fuerte desaparición de carbohidratos con el tiempo asociado a la descomposición.

Aunque se podría esperar un incremento en la concentración de N en la turba al aumentar la profundidad, diversas investigaciones han encontrado que estas concentraciones permanecen bajas y relativamente constantes en toda la parte ombrotórica de las turberas, y que las relaciones C/N son altas tanto en la superficie como en la parte más profunda (Damman, 1978). Esta falta de respuesta de la concentración de N con la profundidad podría indicar dos cosas, o que la descomposición es tan escasa que todo el N es retenido en la turbera o, que la liberación de N está más o menos acoplada a la pérdida de materia orgánica durante la descomposición. Ahora se sabe que durante la descomposición se produce una eliminación relativamente sustancial de N en la turba.

Los estudios realizados sobre la dinámica del N en suelos orgánicos (Malmer y Nihlgard, 1980; Verhoeven y Arts, 1982; Damman, 1988), indican que, a pesar de la lenta descomposición, la liberación de N es mayor que la acumulación en la biomasa microbiana y la fijación por las plantas. Teniendo en cuenta el volumen retenido en la turba debe existir una gran lixiviación del N, que estaría relacionada con fuertes desequilibrios nutricionales que

afectan a los mecanismos enzimáticos microbianos asociados al Ca, Mg y/o P. Como resultado final lo que se observa es un incremento en la relación C/N.

RELACIÓN ENTRE LA EVOLUCIÓN DE LA MASA Y EL CARBONO

La densidad de los suelos orgánicos depende fundamentalmente del grado de evolución de la materia orgánica y de la intensidad de la compactación (Zoltai y Johnson, 1985), aumentando cuando aumentan estos parámetros. Las turberas ombrotóricas de Galicia presentan densidades medias de 0,10 Mg m⁻³, en el rango de 0,09 a 0,12 Mg m⁻³ de las turberas ombrotóricas escocesas (Cuttle, 1983). Por lo que se refiere a sus variaciones con la profundidad, la densidad disminuye rápidamente en los centímetros superficiales (25-60 cm) para mantenerse casi estable a partir de aquí (Fig. 3) y aumentar abruptamente en el contacto con la base mineral. Acompañando al descenso de la densidad se da un incremento simultáneo del carbono.

Como ya hemos mencionado anteriormente, parece que la tendencia general que marca la descomposición de la materia orgánica de la turba implica una acumulación relativa de C y una pérdida de N. Dado que la densidad es una medida de la masa por unidad de volumen, esto implica que la acumulación de C está unida a la pérdida de masa. En la Fig. 4 puede verse que existe una estrecha relación entre la densidad de la turba y el contenido en C ($r^2 > 0,90$). En el acrotelm el ajuste es lineal y es donde se produce una pérdida de masa más intensa y rápida. En el catotelm el enriquecimiento en C no se produce a expensas de cambios tan drásticos en la densidad. Estas circunstancias apoyan la interpretación de que el aumento en C observado en las turberas es una señal de la evolución de la materia orgánica, en relación directa con la pérdida de masa de la turba.

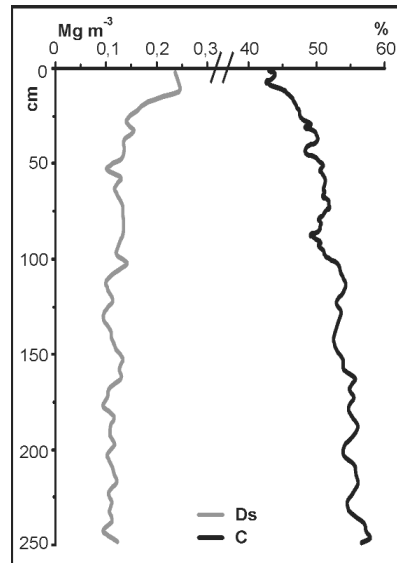


Figura 3. Evolución en profundidad del contenido en carbono (C) y de la densidad de suelo (Ds) en la turbera de Penido Vello (Sierra del Xistral, Lugo).

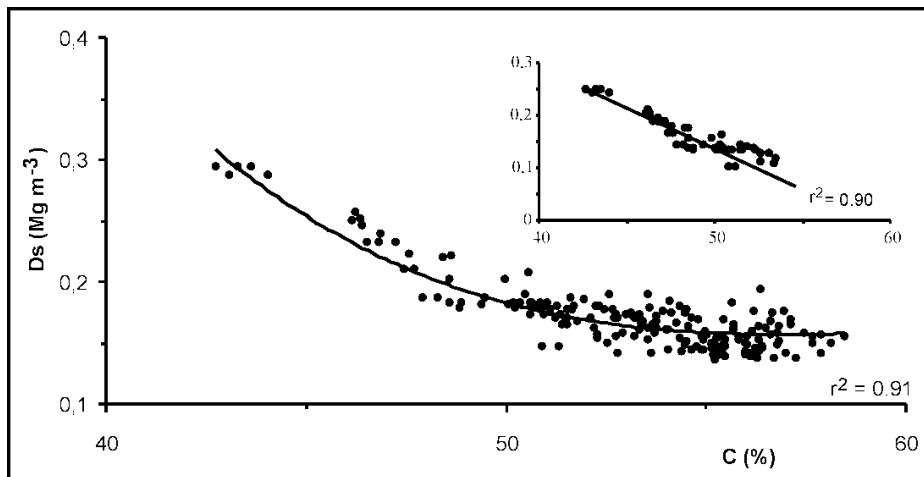


Figura 4. Relación entre el contenido en carbono y la densidad de suelo en turberas ombrotáficas de Galicia. a) sólo acrotelm

EVOLUCIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA DE LA TURBA: ESTUDIO DE 13C NMR

La degradación de los restos vegetales que alcanzan la superficie del suelo es uno de los procesos cruciales en la evolución y en el ciclo global del carbono. Cuando las turberas

son expuestas a cambios ambientales naturales o artificiales, la composición de la materia orgánica resultante refleja las condiciones existentes durante su formación (Tsutsuki y Kondo, 1995). Es decir, los constituyentes de la turba podrían comportarse como marcadores de las señales ambientales. De ahí el interés por co-

nocer las tendencias generales de su evolución, previo al establecimiento de un escenario futuro del comportamiento del C almacenado en las turberas.

Los espectros de resonancia magnética nuclear en estado sólido (CPMAS ^{13}C -NMR) de turbas ombrotóricas de Galicia, obtenidos en el NMR Centre de la Universidad de Wageningen, han permitido la identificación de los siguientes grupos funcionales del carbono: grupos alifáticos (AL), metoxilos (ME), hidroxilos (HI), acetales (AC), aromáticos (AR), fenoles (FE) y carboxilos (CA) (Pontevedra Pombal, 2002; Pontevedra Pombal *et al.*, 2002). En el conjunto del suelo la variación de la evolución del carbono MT, AC, CA y FN es poco destacable en comparación con el carbono AR y especialmente con el AL e HI (Fig. 5). Los carbohidratos (HI+AC) son los compuestos dominantes en la materia orgánica, con un valor medio de $36.8 \pm 5\%$. A esta proporción de carbohidratos participa fundamentalmente el HI ($28 \pm 4.1\%$). El otro gran grupo es el del carbono AL, que presenta una media de $29.5 \pm 3\%$. El resto de los grupos funcionales se presentan en cantidades medias muy inferiores.

A medida que aumenta la profundidad/edad y el grado de evolución de la materia orgánica de la turba, se produce una disminución apreciable de los componentes HI (que pasan de un 49.2% en la superficie a un 25.6% en la muestra basal), un enriquecimiento relativo de los grupos AL y, en los centímetros superficiales, de los grupos AR (Fig. 5). Por lo tanto, los carbohidratos fácilmente degradables (celulosa y hemicelulosa), son consumidos rápidamente durante el período inicial de transformación. Este proceso junto con la anaerobiosis provocará la producción y concentración de compuestos AL y AR recalitrantes, muy ramificados con enlaces cruzados. Este comportamiento fue establecido también en turberas de Suecia por Bergner *et al.* (1990) y de Noruega por Krosshavn *et al.* (1992). En ambos casos, se observó un descenso acusado

del contenido en carbohidratos y un incremento de alifáticos y de lignina, o componentes similares, y sus derivados aromáticos en la turba durante la humificación. Sobre este proceso autigénico parece imprimirse el efecto de las condiciones ambientales internas y externas. La acumulación de compuestos refractarios a la degradación podría jugar un papel relevante respecto al comportamiento como reservorios de C de las turberas ante un cambio climático global, por lo que la verificación del acoplamiento entre la preservación de estas biomoléculas y la acumulación de carbono en la turba es esencial.

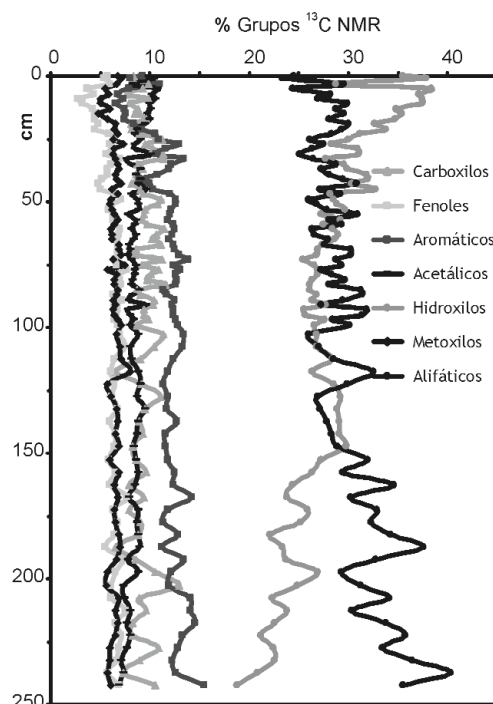


Figura 5. Distribución vertical de los grupos funcionales de ^{13}C RMN en la turbera de Penido Vello (Sierra del Xistral, Lugo).

El estudio de los elementos biófilos muestra que, para turberas ombrotóricas, el carbono presenta un enriquecimiento relativo con la edad asociado a los procesos de descomposición y pérdida de masa. Esta evolución

debería imprimir un efecto sobre los grupos bioquímicos determinados por resonancia magnética nuclear, y el C debería mostrar una relación con la distribución de estas biomoléculas. En la Tabla 1 puede comprobarse que esto es así: el C presenta una correlación positiva con los compuestos AR totales ($r = 0,78$) y AL ($r = 0,63$), y negativa con los grupos de carbohidratos ($r = -0,86$). Resulta evidente que los procesos de humificación–descomposición que determinan el enriquecimiento en carbono de la turba con la edad son los mismos que definen la presencia, ausencia, enriquecimiento o pérdida de los grupos de macromoléculas orgánicas y que la acumulación relativa por preservación selectiva o diagénesis de constituyentes con mayor contenido en carbono es el proceso responsable de este incremento de carbono con la edad en la turba.

Respecto a los mecanismos que participan en la acumulación de carbono, los carbohidratos (HI+AC) muestran una correlación negativa con los componentes FN ($r = -0,76$), AR ($r = -0,89$) y AL ($r = -0,68$) (Tabla 2). Esto podría indicar que una fracción relativamente alta de las estructuras AL y AR, sustituidas o no, de la materia orgánica de la turba derivan de la evolución bioquímica de los carbohidratos durante la humificación. Estos resultados son similares a los obtenidos en suelos orgánicos (Krosshavn *et al.*, 1992; Lu *et al.*, 2000) y en los horizontes superficiales de los suelos minerales (Beyer *et al.*, 1996). La proporción de carbono AL y AR no explicada por la degradación y transformación de los carbohidratos estaría relacionada con la preservación selectiva de moléculas muy resistentes a la alteración biológica y abiótica.

Tabla 1. Correlación entre el contenido en carbono total y los grupos de C (por RMN)

Correlación al	r	N
Carbono		
Carboxilos	0,01	80
Fenoles	0,63	80
Aromáticos	0,78	80
Acetales	-0,67	80
Hidroxiolos	-0,88	80
Carbohidratos	-0,87	80
Metóxiolos	0,22	80
Alifáticos	0,63	80

Tabla 2. Correlación entre los grupos funcionales de C determinados por RMN

r	Carboxilos	Fenoles	Aromáticos	Carbohidratos
Carboxilos				
Fenoles	0,37			
Aromáticos	0,31	0,86		
Carbohidratos	-0,12	-0,76	-0,89	
Alifáticos	-0,46	0,17	0,71	-0,89

CONCLUSIONES

Durante la evolución de la materia orgánica de la turba se acumula carbono. El secuestro de larga duración o la reemisión a la atmósfera de este carbono en el ecosistema será el resultado de la combinación de factores internos propios de la vegetación (histoquímica) y externos o ambientales.

En el proceso descomposición de la turba, se degradan prioritariamente los carbohidratos y se acumulan sustancias alifáticas y aromáticas recalcitrantes, con mayor resistencia a la degradación, por lo que el carbono incorporado en estas biomoléculas será menos reactivo ante cambios ambientales drásticos.

AGRADECIMIENTOS

Parte de esta investigación fue realizada con el apoyo del programa European Community activity Large-Scale Facility en el NMR

Centre de le Universidad de Wageningen (ERBFMGECT950066), con una beca concedida a XPP. Los autores agradecen el asesoramiento de B. van Lagen del Dept. Environmental Sciences, Wageningen University. Igualmente, agradecen la invitación de la Sociedad Española de la Ciencia del Suelo para participar en la Reunión Internacional sobre Secuestro de Carbono en suelos y biomasa celebrado en el CEIDA (Castillo de Santa Cruz, Oleiros, A Coruña) en 2002.

REFERENCIAS

- Adams, D. F.; Farwell, S. O.; Robinson, E.; Pack, M. R. y Barnesberger, W. H. (1981): Biogenic sulfur source strengths. *Environ. Sci. & Technol.*, 15:1493-1498.
- Bergner, K.; Bohlin, E. y Albano, Å. (1990): Vad innehåller torv?. A copilation of botanical physical and chemical data of peat. Centre for Peat Research. Technical Report.
- Beyer, L.; Fründ, R.; Wachendorf, C.; Knicker, H.; Sorge, C.; Köbbemann, C.; Schulten, H. R.; Lüdemann, H. D. y Blume, H. P. (1996): *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 27:2243-2264.
- Buresh, R. J.; Casselman, M. E. Patrick, W. H. (1980): Nitrogen fixation in flooded soil systems, a review. *Advances in Agronomy*, 33:149-192.
- Chapman, R. R. y Hemond, H. F. (1982): Dinitrogen fixation by surface peat and Sphagnum in an ombrotrophic bog. *Can. J. Bot.*, 60:538-543.
- Cuttle, S. P. (1983): Chemical properties of upland peats influencing the retention of phosphate and potassium ions. *J. Soil Science*, 34:75-82.
- Damman, A. W. H. (1978): Distribution and movement of elements in ombrotrophic peat bogs. *Oikos*, 30:480-495.
- (1988): Regulation of nitrogen removal and retention in Sphagnum bogs and other peatlands. *Oikos*, 51:291-305.
- Tolonen, K. y Sallantaus, T. (1993): Element retention and removal in ombrotrophic peat of Häädetkeidas, a boreal finnish peat bog. *Suo*, 43:137-145.
- Franzen, L.G.; Chen, D.; Klinger, L.F. (1996): Principles for a climatic regulation mechanism during the Phanerozoic era, based on carbon fixation in peat-forming wetlands. *Ambio*, 25: 435-442.
- Gorham, E. (1991): Northern peatlands: role in the carbon cycle and probable responses to climatic warming. *Ecological Applications*, 1:182-195.
- Harris, S. M. y Hanson, R. S. (1980): Stratification of aerobic methane-oxidizing organisms in Lake Mendota, Madison, Wisconsin. *Limnol. Oceanogr.*, 25:412-421.
- Hemond, H. (1983): The nitrogen budget of Thoreau's bog. *Ecology*, 64:99-109.
- Hogg, E. H.; Lieffers, V. J. y Wein, R. W. (1992): Potential carbon losses from peat profiles: effects of temperature, drought cycles, and fire. *Ecological Applications*, 2:298-306.
- Immirzi, C. P.; Maltby, E. y Clymo, R. S. (1992): The global status of peatlands and their role in carbon cycling. Wetland Ecosystems Research Group, Dept. Geography, Univ. Exeter. Friends of the Earth, London.
- Janssen, B. H. (1996): Nitrogen mineralization in relation to C:N ratio and decomposability of organic materials. *Plant & Soil*, 181:39-45.
- Johnson, M. G.; Levine, E. R. y Kern, J. S. (1995): *Water, Air & Soil Pollut.*, 82:593-615.
- Kalviäinen, E. y Karunen, P. (1984): On the growth, senescence and decay-resistance of Sphagnum mosses. *Proc. 7th Inter. Peat Congress*, Dublin, 4:263-

- 275.
- King, G. M.; Roslev, P. y Skovgaard, H. (1990): Distribution and rate of methane oxidation in sediments of the Florida Everglades. *Appl. Environ. Microbiol.*, 56:2902-2911.
- Krosshavn, M.; Southon, T. E. y Steinnes, E. (1992): The influence of vegetational origin and degree of humification of organic soils on their chemical composition, determined by solid-state ¹³C NMR. *J. Soil Sci.*, 43:485-493.
- Kuhry, P.; Vitt, D.H. (1996): Fossil carbon/nitrogen ratios as a measure of peat decomposition. *Ecology*, 77: 271-275.
- Lu, X. Q.; Hanna, J. V. y Johnson, W. D. (2000): Source indicators of humic substances: an elemental composition, solid state ¹³C CP/MAS NMR and Py-GC/MS study. *Applied Geochemistry*, 15:1019-1033.
- Macías, F. (2002): Capacidad de secuestro de carbono en suelos y biomasa de Galicia. Reunión Internacional sobre Secuestro de Carbono en Suelos y Biomasa, 5-6 Diciembre de 2002 Santa Cruz, A Coruña. pp. 43-44.
- Malmer, N. y Nihlgard, B. (1980): Supply and transport of mineral nutrients in a subarctic mire. *Ecol. Bull.*, 30:63-95.
- Ó y Wallén, B. (1996): Peat formation and mass balance in subarctic ombrotrophic peatlands around Abisko, northern Scandinavia. *Ecol. Bull.*, 45: 79-92.
- Ó; Svensson, G. y Wallén, B. (1997): Mass balance and nitrogen accumulation in hummocks on a South Swedish bog during the late Holocene. *Ecography*, 20:535-549.
- Martin, N. J. y Holding, A. J. (1978): Nutrient availability and other factors limiting microbial activity in the blanket peat. En: Heal, W. W. y Perkins, D. F. (eds.), *The ecology of some British moors and montane grasslands*. *Ecol. Studies*, 27, Springer-Verlag, Berlin. pp: 113-135.
- Martínez Cortizas, A., Castillo Rodríguez, F.; Blanco Chao, R. (1999): Precipitación. En A. Martínez Cortizas y A. Pérez Alberti (coords) *Atlas Climático de Galicia*, Centro de Información e Teconoloxía Ambiental, *Consellería de Medio Ambiente, Xunta de Galicia*, pp. 77-91.
- Martínez Cortizas, A.; Pontevedra Pombal, X.; Nóvoa Muñoz, J.C.; García-Rodeja, E. (2001): Distribución geográfica y cronología de las turberas de Galicia. En A. Martínez Cortizas y E. García-Rodeja (coords) *Turberas de Montaña de Galicia*, Colección Técnica de Medio Ambiente, Centro de Información e Teconoloxía Ambiental, *Consellería de Medio Ambiente, Xunta de Galicia*, pp. 33-37.
- Naucke, W.; Heathwaite, A. L.; Eggelsmann, R. y Schuch, M. (1993): Mire chemistry. En: Heathwaite, A. L. y Götlich, K. *Mires: Process, Exploitation and Conservation*. *John Wiley & Sons*, Chichester, pp:263-309.
- Pontevedra-Pombal, X. (2002): Turberas de montaña de Galicia. Génesis, propiedades y su aplicación como registros ambientales geoquímicos. Tesis Doctoral, Dpto. Edafología, Fac. Biología, Univ. Santiago de Compostela. 489 pgs.
- Tsutsuki, K. y Kondo, R. (1995): Lignin-derived phenolic compounds in different types of peat profiles in Hokkaido, Japan. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 41:515-527.
- Updegraff, K.; Pastor, J.; Bridgham, S. D. y Johnston, C. A. (1995): Environmental and substrate controls over carbon and nitrogen mineralization in northern wetlands. *Ecological Appl.*, 5:151-163.

- Verhoeven, J. T. A. y Arts, H. H. M. (1992): Carex litter decomposition and nutrient release in mires with different water chemistry. *Aquatic Botany*, 43:365-377.
- Warner, B.; Clymo, R. y Tolonen, K. (1993): Implications of peat accumulation at Point Escuminac, New Brunswick. *Quarter. Res.*, 39:245-248.
- Waughman, G. J. y Bellamy, D. J. (1980): Nitrogen fixation and the nitrogen balance in peatland ecosystems. *Ecology*, 61:1185-1198.
- Zoltai, S. C. Johnson, J. D. (1985): Development of a treed bog island in a minerotrophic fen. *Canadian J. Bot.*, 63:1076-1085.