

FUENTES Y SUMIDEROS DE CARBONO EN EL PARQUE NACIONAL DE LAS TABLAS DE DAIMIEL

MIGUEL ALVAREZ-COBELAS¹, SANTOS CIRUJANO BRACAMONTE²,
JUAN CARLOS RODRÍGUEZ MURILLO¹, GONZALO ALMENDROS MARTÍN¹,
MARÍA ANTONIA RODRIGO ALACREU³, CARMEN ROJO GARCÍA-MORATO³,
MARÍA JOSÉ ORTIZ LLORENTE¹, MARÍA MERCEDES BARÓN RODRÍGUEZ³ Y
SALVADOR SÁNCHEZ CARRILLO¹

RESUMEN

Durante el periodo de estudio, el Parque Nacional fue un sumidero neto de carbono, hasta el extremo de almacenar alrededor de una Tm C ha⁻¹ año⁻¹. Esta cifra es superior a la de humedales de zonas templadas frías y la Amazonía, pero resulta inferior a la del bosque semiárido de pinos y el pastizal templado frío. Los procesos de acumulación de carbono se debieron a la fotosíntesis vegetal casi exclusivamente porque no hubo entrada de agua al humedal que introdujera carbono orgánico en él durante ningún momento del periodo de estudio. La producción de macrófitos emergentes y plantas terrestres fue muy superior a la de macrófitos sumergidos y fitoplancton, pero todas ellas resultaron muy variables según las distintas zonas del humedal. En cuanto a la respiración, la debida a los suelos fue superior a la de cualquier comunidad vegetal, pero siempre muy variable, según las zonas del humedal. Debido a la falta de inundación que padeció el humedal durante el periodo de estudio, las tasas de emisión de metano fueron prácticamente despreciables. Sólo el fitoplancton mostró un cociente emisor (Respiración:Producción) que, en ocasiones, pudo suponer emisión neta de carbono a la atmósfera. Las demás comunidades de productores primarios siempre se comportaron como captadoras netas de carbono, convirtiendo al humedal en un sumidero de carbono. De todos modos, y dada la escasez de agua en el humedal durante los últimos años, la importancia del fitoplancton ha sido muy reducida. Entre un 6 y un 7% de la materia total seca presente en los suelos es carbono orgánico y el carbono inorgánico alcanza alrededor del 14% del peso seco de los suelos. Las zonas con inundación permanente y/o inundación periódica son las más ricas en carbono recalcitrante y en ellas predominan compuestos carbonados ricos en grupos metilo, metoxilo y alkilo. La diversidad del fitoplancton se ha mantenido en el Parque Nacional y la de plantas terrestres ha aumentado, pero la de macrófitos emergentes y sumergidos se ha reducido respecto a años anteriores. En general, la biomasa de productores primarios ha resultado muy variable.

Palabras-clave: dióxido de carbono, metano, carbono orgánico recalcitrante, respiración, producción, comunidades biológicas, suelos

¹ CSIC-Instituto de Recursos Naturales, Serrano 115 dpdo., 28006 Madrid. Correspondencia: Miguel Alvarez Cobelas. malvarez@ccma.csic.es

² CSIC-Real Jardín Botánico de Madrid, Pza. Murillo 2, 28014 Madrid.

³ Instituto Cavanilles de Biodiversidad y Biología Evolutiva, Universidad de Valencia, Apartat Oficial 2085, 46071 Valencia.

SUMMARY

Our results have shown that this wetland is a net carbon sink, up to 1 ton C ha⁻¹ y⁻¹, such a figure being higher than those in cold temperate wetlands and Amazon areas. Carbon accumulation processes resulted from plant photosynthesis since no water inputs occurred throughout the study period. Emergent and terrestrial plant production was higher than that of phytoplankton and submerged vegetation. Soil respiration was higher than plant respiration. Methane emission was negligible because of the lack of significant flooding area throughout the study period. Most plant communities, except phytoplankton population at times, behaved as carbon sinks. Up to 7% of overall soil matter was made up by organic carbon, with recalcitrant carbon (organic compounds rich in alkyl, methoxyl and methyl groups) accumulating in permanent and cyclic flooded areas. Phytoplankton species richness did not change over time, but that of terrestrial plants increased and those of submerged and emergent plants decreased in the wetland as compared with those of previous years. The biomass of primary producers was highly fluctuating.

Key words: carbon dioxide, methane, recalcitrant organic carbon, respiration, production, biological communities, soils.

INTRODUCCIÓN

Las zonas húmedas de la Tierra se encuentran entre los ecosistemas más valiosos en términos de los bienes que poseen y de los servicios naturales que prestan (COSTANZA *et al.* 1997). Los sumideros de carbono de un humedal están constituidos por la producción primaria y la inmovilización del carbono en los sedimentos, mientras que las emisiones de carbono las generan la respiración de los organismos y la fermentación de la materia orgánica (metanogénesis). En muchos humedales, hay –además– una entrada externa de carbono orgánico, transportado por los cauces de entrada y que procede de la cuenca hidrográfica en la que se enclavan; dicha carga puede llegar a ser muy importante, especialmente si en la cuenca se produce contaminación orgánica. Tanto las fuentes como los sumideros de carbono no se han cuantificado aún en Las Tablas de Daimiel.

La producción primaria de los humedales la llevan a cabo las plantas emergentes, las plantas sumergidas y el fitoplancton, y resulta muy elevada (6-60 g C m⁻² día⁻¹; BRINSON *et al.* 1981). Dicha producción se ve estimulada por la entrada de nutrientes procedentes de las cuencas hidrográficas en las que se hallan los humedales y por la propia carga interna de nutrientes almacenada en

el sedimento, resultado de la descomposición de la producción pasada (SÁNCHEZ CARRILLO & ALVAREZ COBELAS 2001). Sustancialmente, la producción primaria tiene lugar en el plancton, el bentos sumergido y el bentos emergente. En el primer caso, se trata de organismos microscópicos, pero en los dos últimos el mayor porcentaje de la producción se debe a los hidrófitos y helófitos (CRONK & FENNESSY 2001). Para tener una idea de la producción primaria de los humedales si ésta se analiza con técnicas “in situ”, es preciso abordarla en las tres comunidades, integrando toda la información cuantitativa de medidas posteriormente para el conjunto del humedal.

La respiración de los humedales es efectuada mayoritariamente por las bacterias y por los productores primarios, en razón de la mayor biomasa relativa de ambos, comparada con la de los animales (MITSCH & GOSELINK 2001). En general, puede afirmarse que la respiración de los humedales, entendida como pérdida de carbono hacia la atmósfera, podría acercarse a la producción primaria, llegando incluso a superarla en algunas ocasiones (HOPKINSON 1992, CRAFT & CASEY 2000, DAVISON & ARTAXO 2004). Es decir, la producción neta de los productores primarios puede llegar a ser muy baja (MIDDELBURG *et al.* 1997) o incluso negativa, sobre todo, si se incluyen la respiración bacteriana y la del

resto de organismos heterótrofos (DUARTE & PRAIRIE 2005, ROEHM 2005).

En términos del Cambio Global, la incorporación de carbono por los productores primarios de los humedales podría ser inferior a la suma de la emisión aerobia de carbono en la respiración, que se realiza en forma de dióxido de carbono, y a la emisión de carbono por fermentación de la materia orgánica (la metanogénesis; BARTLETT & HARRISS 1993). Los humedales, por tanto, no siempre funcionarían como sumideros de carbono, sino también –a veces– como emisores netos. La relación $C_{\text{emitido}}:C_{\text{incorporado}}$ (lo que llamaremos el “Cociente Emisor”) puede, por tanto, ser muy variable, dependiendo de las condiciones climáticas, de los aportes exteriores de nutrientes (incluyendo el carbono orgánico) y de la carga interna de cada humedal (BONDAVALLI *et al.* 2000, CUI *et al.* 2005). Así, una mayor producción primaria significará la reducción o incluso eliminación del “Efecto Emisor”, aunque el carácter de fuente (Cociente Emisor > 1) o sumidero (Cociente Emisor < 1) haya que precisarlo para cada humedal y pueda ser cambiante según la época del año. Dióxido de carbono y metano son, además, dos gases de efecto invernadero (HOUGHTON *et al.* 2001). En cualquier caso y hasta ahora, en Las Tablas de Daimiel no se han caracterizado su producción primaria, su respiración o su producción de metano.

Dentro del balance fuentes-sumideros, hay otro aspecto que no hemos considerado aún y es el de la sedimentación. Cuando las plantas mueren, la materia orgánica que las compone se deposita sobre suelos y sedimentos y comienza a descomponerse, pero dicha descomposición varía según el tipo de vegetal (RIBEIRO *et al.* 2004) y, dado el alto cociente elemental carbono:nitrógeno de la vegetación superior (CEBRIÁN & DUARTE 1995), la descomposición total suele tener lugar lentamente (VYMAZAL 1994), acumulándose mucha materia orgánica en el humedal (la conocida turba), lo cual representa sumidero adicional de carbono. Además, parte del material sedimentado no se mineraliza, no se respira ni aerobia ni anaeróticamente, ni –por tanto– pasa a la atmósfera, sino que queda inmovilizado en el sedimento, pudiendo llegar a convertirse en una

fracción bastante refractaria a las transformaciones por acción de la combustión interna: es lo que se conoce como “carbono negro” o carbono recalcitrante (“black carbon”; MASIELLO 2004). Este carbono inmovilizado parece ligarse a la fracción mineral mediante enlaces fuertes (GONZÁLEZ VILA & ALMENDROS 2003), formando compuestos muy estables e inmunes a cualquier proceso de respiración; la acumulación de dicho carbono supone un descenso en el “cociente emisor”, pero se ignora la proporción de ese carbono en cada tipo de humedal y, además, apenas se tienen algunos indicios sobre su composición química y sus relaciones con la matriz del sedimento (JOKIC *et al.* 2003, MEAD *et al.* 2005). En Las Tablas ha habido varios episodios de combustión de la turba desde 1980 hasta la actualidad (DE BUSTAMANTE *et al.* 1995), los cuales indudablemente habrán generado carbono negro. Por lo tanto, un estudio pormenorizado de la “cantidad” (concentración) y de la “calidad” (composición molecular) de ese carbono negro sería muy interesante para poder evaluar con más precisión el “cociente emisor” en las Tablas de Daimiel.

El carácter autótrofo/heterótrofo neto de un humedal no es contradictorio con la importante acumulación de carbono que se da en los sedimentos. Los humedales del mundo contienen cerca del 10% del carbono edáfico mundial, representando sólo el 2% de la superficie terrestre (SCHLESINGER 1997). Los humedales son, pues, sumideros importantes de carbono, sirviendo de «acumuladores» de parte del carbono que les llega desde sus respectivas cuencas de drenaje y/o aguas subterráneas. Este carácter de depósito de carbono es patente en los suelos y sedimentos del Parque Nacional Las Tablas de Daimiel, con depósitos de turba de gran espesor (DE LA HORRA 1996, ALMENDROS *et al.* 1982, RUIZ ZAPATA *et al.* 2001), lo que indica un prolongado funcionamiento como sumidero de carbono. Los sucesivos periodos de sequía, los incendios y otras afecciones ambientales, muy probablemente acentuadas por el cambio planetario en curso, podrían afectar negativamente a esta característica del Parque.

Por último, conviene señalar que Las Tablas de Daimiel padecen una contaminación crónica pro-

cedente de su cuenca hidrográfica (ALVAREZ COBELAS *et al.* 2001). La relación entre la superficie de la cuenca hidrográfica y la del humedal es de 750:1, de modo que –por muy bien que funcionasen las instalaciones de depuración– la carga de materia orgánica que recibe es muy notable (CIRUJANO *et al.* 2002), pues se halla enclavado en una cuenca de unos 200.000 habitantes. El Parque Nacional ha experimentado entre uno y tres episodios anuales de contaminación orgánica intensa desde la década de 1980 y cargas notables de carbono durante el resto del tiempo que ha tenido aportes de agua fluvial, procedentes o no del Trasvase Tajo-Segura (ALVAREZ COBELAS, datos inéditos). Dicho carbono orgánico es un sustrato adicional para la respiración bacteriana en el humedal, contribuyendo a las emisiones de carbono del mismo y alterando el Cociente Emisor.

Este Proyecto de Investigación tuvo como principal objetivo cuantificar las fuentes y sumideros de carbono en el Parque Nacional de Las Tablas de Daimiel, usando dos enfoques: uno compartimentado y otro sintético. En el primero se analizaron las fuentes y sumideros en suelos y en las principales comunidades biológicas. En el segundo, que “a priori” no estaba contemplado, se usó una torre de medida de CO₂ mediante correlación turbulenta, prestada por un investigador mexicano, con objeto de cuantificar globalmente la captura o emisión de ese compuesto por el Parque Nacional. De nuestros resultados se esperaba también que dieran lugar a la formulación de criterios para la gestión ambiental del carbono en el Parque.

Las actividades realizadas en el curso de este Proyecto fueron las siguientes:

Actividad 1. Recopilación de la información existente sobre diversidad fitoplanctónica y de macrófitos, así como datos sobre concentraciones de carbono, producción y respiración.

Actividad 2. Estudio de las cargas de carbono fluvial que entran al humedal.

Actividad 3. Análisis de la producción primaria y la respiración del plancton y los tapetes mi-

crobianos de los puntos seleccionados del humedal.

Actividad 4. Análisis de la producción primaria y la respiración de los macrófitos sumergidos y emergentes de los puntos seleccionados y de la respiración edáfica.

Actividad 5. Análisis de la emisión de metano por el sedimento y a través de la vegetación de Las Tablas.

Actividad 6. Estimación de las concentraciones de carbono orgánico y mineral en agua y sedimento.

Actividad 7. Determinación de la composición molecular del carbono presente en los sedimentos, incluyendo el carbono negro.

Actividad 8. Análisis estructural de fitoplancton, tapetes microbianos, bacterias y macrófitos.

Actividad 9. Propuesta de criterios de gestión del carbono orgánico en el Parque Nacional.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS TABLAS DE DAIMIEL

Algunos estudios paleontológicos indican que Las Tablas ya existían probablemente a finales de la Era Terciaria (unos 2 millones de años) y con toda seguridad hace 350.000 años, cuando eran un gran lago. Por debajo de Las Tablas siempre ha habido un acuífero subterráneo. Las Tablas han sido históricamente el resultado del encharcamiento del terreno por dos ríos, uno de los cuales era de origen subterráneo (el Guadiana) y otro fluía por la superficie (el Gigüela), modificado por la acción humana local. Su extensión en los años '50 superaba los 100 km², probablemente. Las Tablas pertenecieron a la Orden Militar de Calatrava, pero la propiedad se desamortizó en el siglo XIX, pasando a ser coto de caza privado, Reserva Nacional de Caza tras la última Guerra Civil y, desde 1973, Parque Nacional.

¿Cuáles son los valores ambientales de Las Tablas? Se trata(ba) de un ecosistema situado en una llanura de inundación, con aportaciones de

aguas superficiales y subterráneas de distinta salinidad, favoreciendo la vida de una flora y una fauna muy ricas. En Europa hay pocos ambientes así (los lagos del río Spree cerca de Berlín y el valle del río Shannon en Irlanda). En el mundo, lo más parecido está en Iraq, entre el Tigris y el Eufrates, en los Everglades de Florida y en el delta del Okavango, en Botswana. En cualquier caso, se trata de un ambiente muy pequeño (ahora unos 20 km²) en una cuenca hidrográfica muy grande (unos 15.000 km²), de modo que los problemas de la cuenca acaban, tarde o temprano, repercutiendo sobre Las Tablas.

Durante los años '50-'60 gran parte de Las Tablas fueron desecadas para combatir el paludismo y obtener tierras de cultivo. En 1973 se crea el Parque Nacional, en un intento de conservar lo que quedaba del ecosistema tras la desecación (unos 10 km², luego ampliados al doble en las décadas sucesivas por la compra de tierra no inundable de los alrededores). En los '70 y '80 se pusieron en regadío con aguas subterráneas más de 1000 km² en su cuenca hidrográfica. Como resultado, el agua subterránea no volvió a inundar el humedal desde 1986. En 1987 un incendio intencional quemó también, además de la vegetación, la turba subyacente en una parte del humedal. Una autocombustión subterránea dio lugar a otro incendio de la turba en agosto de 2009.

Durante las últimas tres décadas, la falta de agua ha sido el problema fundamental para Las Tablas, agravado por el hecho de que cuando llegaba agua, ésta venía contaminada por las aguas residuales de origen agrícola y urbano de los municipios situados aguas arriba. Las actividades en el transcurso de este Proyecto se han visto condicionadas por la inexistencia de aportes de agua al Parque Nacional durante el periodo de estudio. Las zonas inundadas lo han sido por bombeo de agua desde pozos adyacentes en la zona de uso público del mismo, menos de 10 Ha en conjunto. La vegetación dominante de helófitos forma manchas de carrizo (*Phragmites australis*) y masiega (*Cladium mariscus*), pero durante el periodo de estudio, y debido a la falta de agua, ha sido muy conspicua la vegetación de plantas anuales terrestres. En el agua, además de plancton de ambientes hipertróficos, hay algunas pra-

deras del carófito *Chara hispida* en las zonas de mejor calidad y más transparencia.

Para más información científica sobre el paraje, pueden consultarse los escritos de ALVAREZ COBELAS & CIRUJANO (1996, 2007) ALVAREZ COBELAS *et al.* (2007a, b) y SÁNCHEZ CARRILLO & ANGELER (2010), así como la hoja "web" www.humedalesibericos.com.

MATERIAL Y MÉTODOS

La toma de muestra se ha realizado en distintas zonas del Parque Nacional, procurando que fueran representativas de la variabilidad espacial del mismo, tanto edáfica como en cuanto a las principales comunidades vegetales. En el caso de los muestreos acuáticos, debimos limitarnos a las escasísimas zonas con agua existentes entre enero de 2007 y diciembre de 2008, la mayor parte de las cuales se fueron desecando a lo largo de 2007. Como ya hemos señalado, durante el periodo de estudio no hubo entradas de agua fluvial.

Desde el punto de vista metodológico, el proyecto ha debido conjugar numerosas técnicas analíticas, tales como:

Estimación de respiración en suelos y fotosíntesis en vegetación superior mediante análisis infrarrojo de CO₂ (IRGA, JONSSON *et al.* 2003).

Evaluación global de las emisiones o incorporaciones de CO₂ mediante una torre de medida con correlación turbulenta (BERGER *et al.* 2001).

Análisis químico de suelos y aguas (APHA 1992, VAN REEUWIJK 1987, BENNER & STROM 1993).

Estimación de biomasa vegetal aérea y subterránea (CRONK & FENNESSY 2001).

Estimación de cobertura vegetal mediante fotografía aérea (CRONK & FENNESSY 2001).

Estimación de emisión de metano por cromatografía de gases (LAMMERS & SUESS 1994).

Estimación de la composición y la biomasa microbianas mediante la reacción en cadena de la polimerasa (PCR; LANE 1991) y el recuento por microscopía de fluorescencia (HOBBIE *et al.* 1977).

Estimación de biomasa planctónica mediante microscopía óptica (ROTT, 1981).

Producción y respiración de plancton y macrófitos sumergidos mediante el método de Winkler (CARRIT & CARPENTER 1976, WESTLAKE 1969).

Estimación de carbono recalcitrante en sedimentos mediante espectroscopía con resonancia magnética nuclear (JOKIC *et al.* 2003, MEAD *et al.* 2005).

RESULTADOS

El objetivo principal del proyecto era comprobar si el Parque Nacional funcionaba como una fuente o como un sumidero neto de carbono. De la enorme cantidad de medidas realizadas podemos concluir que el Parque fue un sumidero neto de carbono durante el periodo de estudio, hasta el extremo de almacenar alrededor de una $Tm C ha^{-1} año^{-1}$.

Los objetivos parciales del proyecto fueron los siguientes:

- 1º) Estimación de las cargas de entrada de carbono por los ríos que descargan en Las Tablas. Sin embargo, este objetivo no pudo cumplirse, pues no hubo entrada alguna de agua por vía fluvial durante el periodo de estudio.
- 2º) Estimación de la producción primaria actual de plancton, macrófitos emergentes y macrófitos sumergidos en el humedal.

La producción de macrófitos emergentes (en ascendió a 150-3500, 300-970 y 70-1700 $g C m^{-2} año^{-1}$ para carrizo, masiega y plantas anuales, respectivamente. La de macrófitos sumergidos fue de 100-160 $g C m^{-2} año^{-1}$. Y la de fitoplancton osciló entre -150 y 60 $g C m^{-2} año^{-1}$ (ROJO *et al.* 2010), lo cual sugiere que –en

ocasiones– la producción primaria neta del fitoplancton fue negativa por ser mayor la importancia de la respiración que la de la producción bruta.

- 3º) Estimación de la respiración de plancton (incluyendo bacterias), macrófitos emergentes, macrófitos sumergidos y suelos en el humedal. Carrizo y masiega emergentes respiraron 177-362 y 107-115 en $g C m^{-2} año^{-1}$, respectivamente.

Para las plantas anuales carecemos de datos. Sin embargo, los suelos respiraron entre 950 y 1250 $g C m^{-2} año^{-1}$, mientras que la respiración de los macrófitos sumergidos osciló entre 80 y 130, y la del plancton, entre 60 y 90 $g C m^{-2} año^{-1}$.

- 4º) Estimación de la emisión de metano por el humedal. Debido a la falta de inundación que padeció el humedal durante el periodo de estudio, las tasas de emisión de metano fueron prácticamente despreciables. Si hubiera habido inundación, es probable que la emisión de metano hubiera sido de importancia, reduciendo así la cantidad de carbono acumulada (“sumida”) en el humedal.
- 5º) Estimación del “Cociente Emisor” actual (Respiración:Producción) de productores primarios y bacterias en el humedal. Si el cociente emisor es superior a la unidad, la comunidad biológica de que se trate actuará como emisor neto de carbono, mientras que si es inferior a esa cifra, lo hará como sumidero de carbono. Los macrófitos emergentes (carrizo y masiega) presentaron un cociente emisor que osciló entre 0,2 y 0,35, mientras que los macrófitos sumergidos (*Chara hispida*) mostraron un cociente fluctuante entre 0,4 y 0,5. Sólo el cociente emisor del fitoplancton superó en ocasiones la unidad, variando entre 0,9 y 1,1. Vemos, pues, que la mayor parte de los productores primarios funcionó como sumidero de carbono y únicamente el fitoplancton pudo hacerlo en ocasiones como fuente de carbono. De todos modos, y dada la escasez de agua en el humedal durante los últimos años, la importancia del fitoplancton ha debido resultar muy reducida.

- 6°) Caracterización de la concentración y composición molecular del “carbono de caja negra” (carbono recalcitrante) de los sedimentos en Las Tablas de Daimiel. Entre un 6 y un 7% de la materia total seca presente en sus suelos está compuesto por carbono orgánico y el carbono inorgánico alcanza alrededor del 14% del peso seco de los suelos. Las zonas con inundación permanente y/o inundación periódica resultaron las más ricas en carbono de caja negra y en ellas predominan compuestos carbonados ricos en grupos metilo, metoxilo y alquilo.
- 7°) Estimación de la biodiversidad y la biomasa actuales de los productores primarios (planc-ton, bentos emergente y sumergido) de Las Tablas de Daimiel. Durante el periodo de estudio, el número de taxones de bacterias del agua ascendió a unas 169, mientras que el de bacterias del sedimento fue de 115 (D'AURIA *et al.*, en prensa). Las especies de fitoplancton identificadas fueron 113, hubo una especie de macrófito sumergido (*Chara hispida*) y tres de macrófitos emergentes (*Phragmites australis*, *Cladium mariscus*, *Scirpus maritimus*). Y el número de especies de plantas anuales terrestres supuso 306.

En cuanto a la biomasa, fue muy variable, pues la de bacterias del agua osciló entre 0,001 y 1,5 g C m⁻², la del fitoplancton entre 0,001 y 11 g C m⁻², la de las plantas sumergidas pudo fluctuar entre 100 y 156 g C m⁻², siendo la de las plantas emergentes de 40 a 5050 g C m⁻² y la de las plantas anuales terrestres, entre 50 y 1700 g C m⁻².

- 8°) Detección de las tasas de acumulación del carbono en los sedimentos de Las Tablas de Daimiel. La falta de agua en el Parque Nacional durante el periodo de estudio ha impedido estimar estas tasas.

A la vista de estos resultados, nuestras sugerencias para la gestión del carbono en el Parque Nacional han sido las siguientes:

- Eliminación de sedimentos (capa de 20-30 cms) contaminados en todo el Parque

- Eliminación de biomasa vegetal anual en todo el Parque.

La primera de ellas ya se ha realizado durante el año 2009. La segunda dependerá de la situación de inundación del humedal.

DISCUSIÓN

La principal conclusión de nuestro trabajo es que Las Tablas han sido un sumidero neto de carbono durante el periodo de estudio, hasta el extremo de almacenar alrededor de una Tm C ha⁻¹ año⁻¹. Esta cifra resulta superior a las de humedales de zonas templadas frías (0,08-0,6 Tm C ha⁻¹ año⁻¹; ROULET 2000) y la Amazonía (0,5 Tm C ha⁻¹ año⁻¹; DAVIDSON & ARTAXO 2004). Y, sin embargo, es inferior a la del bosque semiárido de pinos (1,6 Tm C ha⁻¹ año⁻¹; DORE *et al.* 2008) y el pastizal templado frío (1,9-2,6 Tm C ha⁻¹ año⁻¹; JAKSIC *et al.* 2006). A efectos comparativos, debe señalarse que los ambientes de agricultura intensiva emiten unos 21 Tm C ha⁻¹ año⁻¹ (ELDER & LAL 2008), con lo cual la existencia de humedales contribuye a mitigar las emisiones de CO₂ y, de ahí, otro interés adicional (otro servicio ambiental, en realidad) para la conservación de los mismos, aparte del clásico relacionado con el mantenimiento del patrimonio natural.

El proyecto pretendía realizar un balance de carbono en el Parque Nacional de Las Tablas de Daimiel. Los resultados se han visto claramente afectados por la falta de aportes hídricos al mismo durante el periodo de estudio. En la situación de falta de agua, el Parque Nacional resultó un sumidero neto de carbono, debido –sobre todo– a la fijación del CO₂ por las plantas emergentes y, en particular, por las terrestres anuales. De haber estado inundado el humedal durante el periodo de estudio, es probable que la acumulación de carbono fuera más reducida, debido a las mayores emisiones de metano por bacterias y de CO₂ por el plancton y a la menor captación de CO₂ por las plantas terrestres, pero éste es un extremo con el que sólo se puede especular.

En cuanto a la gestión ambiental del carbono en el Parque Nacional, creemos que las medidas

adoptadas serán beneficiosas para el mismo, pero –dada la extraordinaria producción por plantas terrestres en los años sin agua– conviene realizar las extracciones de la materia orgánica vegetal muerta (carrizo y plantas anuales) sostenidamente, todos los años, en tanto que el Parque no recupere su pérdida funcionalidad hídrica.

AGRADECIMIENTOS

La realización de este Proyecto no hubiera sido posible sin la generosa concesión del mismo por el Organismo Autónomo Parques Nacionales en su convocatoria de 2005. Tampoco hubiera podido realizarse sin el apoyo que en todo momento nos han prestado el Director-Conservador del Parque Nacional, Carlos Ruiz de la Hermosa, y

todo el personal del mismo. La Profesora Amparo Latorre, del Instituto Cavanilles de Biodiversidad (Univ. Valencia), ha sido fundamental para evaluar la diversidad microbiana acuática de Las Tablas de Daimiel mediante técnicas moleculares. Parte de los análisis de carbono orgánico recalcitrante, presente en los suelos de Las Tablas, se han hecho en el laboratorio del Grupo de Ciencias del Suelo de la Universidad de Múnich (Alemania), dirigido por la Profesora Heike Knicker. Finalmente, el equipo de la Universidad de Sonora (México), dirigido por el Profesor Jaime Garatuza, nos ha prestado durante un año un equipo de covarianza turbulenta para medir las emisiones de CO₂ de Las Tablas. Fernando Valladares (CSIC) y Nuria Navarro (Univ. Rey Juan Carlos) nos prestaron amablemente sendos equipos de IRGA y volumetría automática, respectivamente.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMENDROS, G., POLO, A. & DORADO, E. 1982. Composición y propiedades de la materia orgánica de las formaciones turbosas eutróficas de la zona de los Ojos del Guadiana. *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural (Sección de Biología)* 80: 23-35.
- ALVAREZ COBELAS, M. & CIRUJANO, S. (eds.) 1996. *Las Tablas de Daimiel: Ecología acuática y sociedad*. Organismo Autónomo Parques Nacionales. Madrid.
- ALVAREZ COBELAS, M., CIRUJANO, S. & SÁNCHEZ CARRILLO, S. 2001. Hydrological and botanical man-made changes in the Spanish wetland of Las Tablas de Daimiel. *Biological Conservation* 97: 89-97.
- ALVAREZ COBELAS, M. & CIRUJANO, S. 2007. Multilevel responses of emergent vegetation to environmental factors in a semiarid floodplain. *Aquatic Botany* 87: 49-60.
- ALVAREZ COBELAS, M., SÁNCHEZ-CARRILLO, S. & CIRUJANO, S. 2007a. Strong site effects dictate nutrient patterns in a Mediterranean floodplain. *Wetlands* 27: 326-336.
- ALVAREZ COBELAS, M., SÁNCHEZ CARRILLO, S., CIRUJANO, S. & ANGELER, D.G. 2007b. Long-term changes in spatial patterns of emergent vegetation in a Mediterranean floodplain: natural versus anthropogenic constraints. *Plant Ecology* 194: 257-271.
- APHA, 1992. *Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales*. 17ª edición of the Standard Methods. Editorial Díaz de Santos. Madrid.
- BARTLETT, K.B. & HARRISS, R.C. 1993. Review and assessment of methane emissions from wetlands. *Chemosphere* 26: 261-320.
- BENNER, R. & STROM, M. 1993. A critical evaluation of the analytical blank associated with DOC measurements by high-temperature catalytic oxidation. *Marine Chemistry* 41: 153-160.
- BERGER, B.W., DAVIS, K. J., YI, C., BAKWIN, P.S. & ZHAO, C. L. 2001. Long-term carbon dioxide fluxes from a very tall tower in a Northern forest: Flux measurement methodology. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 18: 529-542.
- BONDAVALLI, C., ULANOWICZ, R.E. & BODINI, A. 2000. Insights into the processing of carbon in the South Florida Cypress Wetlands: a whole-ecosystem approach using network analysis. *Journal of Biogeography* 27: 697-710.

- BRINSON, M.M., LUGO, A.E. & BROWN, S. 1981. Primary productivity, decomposition and consumer activity in freshwater wetlands. *Annual Review of Ecology and Systematics* 12: 123-161.
- CARRIT, D.E. & CARPENTER, J. 1976. Comparison and evaluation of currently deployed modifications of the Winkler method for determining dissolved oxygen in seawater: a NASCO report. *Journal of Marine Research* 24: 287-318.
- CEBRIÁN, J. & DUARTE, C.M. 1995. Plant growth rate dependance of detrital carbon storage in ecosystems. *Science* 268: 1606-1608.
- CIRUJANO, S. et al. 2002. Seguimiento y recuperación ambiental del P.N. Las Tablas de Daimiel. Informe Final para el Organismo Público Parques Nacionales. Madrid.
- COSTANZA, R., D'ARGE, R., DE GROOT, R., FARBER, S., GRASSO, M., HANNON, B., LIMBURG, K., NAEEM, S., O'NEILL, R.V., PARUELO, J., RASKIN, R.G., SUTTON, P. & VAN DEN BELT, M. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387: 253-260.
- CRAFT, B.C. & CASEY, P.W. 2000. Sediment and nutrient accumulation in floodplain and depressional freshwater wetlands of Georgia, USA. *Wetlands* 20: 323-332.
- CRONK, J.K. & FENNESSY, M.S. 2001. *Wetland Plants. Biology and Ecology*. Lewis Publishers. Boca Raton.
- CUI, J., LI, C. & TRETIN, C. 2005. Analyzing the ecosystem carbon and hydrologic characteristics of forested wetland using a biogeochemical process model. *Global Change Biology* 11: 278-289.
- D'AURIA, G., BARÓN, M.M., DURBÁN, A., MOYA, A., ROJO, C., LATORRE, A. & RODRIGO, M.A. (en prensa). Unravelling the bacterial diversity found in the semiarid "Tablas de Daimiel National Park" wetland (Central Spain). *Aquatic Microbial Ecology*.
- DAVIDSON, E.A. & ARTAXO, P. 2004. Globally significant changes in biological processes of the Amazon Basin: results of the Large-scale Biosphere-Atmosphere Experiment. *Global Change Biology* 10: 519-529.
- DE BUSTAMANTE, I., DORADO, M., ROJAS, B., TEMIÑO, J., SEGURA, M., GARCÍA-HIDALGO, J., PÉREZ DEL CAMPO, P., VALDEOLMILLOS, A., SICILIA, F., FERNÁNDEZ REINA, I. & LÓPEZ BLANCO, M.J. 1995. Análisis del impacto ambiental de la explotación de los depósitos de turba asociados al río Guadiana en la Llanura manchega e interés de su conservación. Informe Final para la Fundación Ramón Areces. Madrid.
- DE LA HORRA, J.L. 1996. El medio edáfico. En: M. ALVAREZ COBELAS & S. CIRUJANO (eds.) *Las Tablas de Daimiel, Ecología acuática y sociedad*. pp. 35-46. Organismo Autónomo Parques Nacionales. Madrid.
- DUARTE, C.M. & PRAIRIE, Y.T. 2005. Prevalence of heterotrophy and atmospheric CO₂ emissions from aquatic ecosystems. *Ecosystems* 8: 862-870.
- DORE, S., KOLB T.E., MONTES-HELU, M., SULLIVAN, B.W., WINSLOW, W.D., HART, S.C., KAYE, J.P., KOCH, G.W. & HUNGATE, G.A. 2008. Long-term impact of a stand-replacing fire on ecosystem CO₂ exchange of a ponderosa pine forest. *Global Change Biology* 14: 1801-1820.
- ELDER, J.W. & LAL, R. 2008. Tillage effects on gaseous emissions from an intensively farmed organic soil in North Central Ohio. *Soil and Tillage Research* 98: 45-55.
- GONZÁLEZ VILA, F. & ALMENDROS, G. 2003. Thermal transformation of soil organic matter by natural fires and laboratory controlled heatings. En: R. IKAN (ed.) *Natural and laboratory simulated thermal geochemical processes*. pp. 153-200. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht.
- HOBBIE, J.E., DALEY, R. & JASPER, S. 1977. Use of Nucleopore filters for counting bacteria by fluorescence microscopy. *Applied and Environmental Microbiology* 33: 1225-1228.
- HOPKINSON, C.S. 1992. A comparison of ecosystem dynamics in freshwater wetlands. *Estuaries* 15: 549-562.
- HOUGHTON J.T. et al. (eds.) 2001. *Climate Change: The Scientific Basis*. Cambridge University Press. Cambridge.

- JAKSIC, V., KIELY, G., ALBERTSON, A., OREM, R., KATUL, G., LEAHY, P. & BYRNE, K.A. 2006. Net ecosystem exchange of grassland in contrasting wet and dry years. *Agriculture and Forest Meteorology* 139: 323-334.
- JOKIC, A., CUTLER, J.N., PONOMARENKO, E., VAN DER KAMP, G. & ANDERSON, D.W. 2003. Organic carbon and sulphur compounds in wetland soils: Insights on structure and transformation processes using K-edge XANES and NMR spectroscopy. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 67: 2585-2597.
- JONSSON, A., KARLSSON, J. & JANSSON, M. 2003. Sources of carbon dioxide supersaturation in clearwater and humic lakes in Northern Sweden. *Ecosystems* 6: 224-235.
- LAMMERS, S. & SUESS, E. 1994. An improved head-space analysis method for methane in seawater. *Marine Chemistry* 47: 115-125.
- LANE, D.D.J. 1991. 16S/23S rRNA sequencing. John Wiley & Sons, London.
- MASIELLO, C.A. 2004. New directions in black carbon organic geochemistry. *Marine Chemistry* 92: 201-213.
- MEAD, R., XU, Y., CHONG, J. & JAFFÉ, R. 2005. Sediment and soil organic matter source assessment as revealed by the molecular distribution and carbon isotopic composition of n-alkanes. *Organic Geochemistry* 36: 363-370.
- MIDDELBURG, J.J., NIEUWENHUIZE, J., LUBBERTS, J.K. & VAN DE PLASSCHE, O. 1997. Organic carbon isotope systematics of coastal marshes. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 45: 681-687.
- MITSCH, W.J. & GOSSSELINK, J.G. 2001. *Wetlands*. 3rd edition. Van Nostrand Reinhold, New York.
- RIBEIRO, M.D., ALVAREZ COBELAS, M., RIOLOBOS, P. & CIRUJANO, S. 2004. Descomposición de los helófitos en un humedal semiárido hipertrófico. *Anales del Jardín Botánico de Madrid* 61: 53-61.
- ROEHM, C.L. 2005. Respiration in wetland ecosystems. En: P. DEL GIORGIO & P. LEB WILLIAMS (eds.) *Respiration in Aquatic Ecosystems*. pp. 83-102. Cambridge University Press. Cambridge.
- ROJO, C., BARÓN, M.M., ALVAREZ COBELAS, M. & RODRIGO, M.A. 2010. Sustained primary production with changing phytoplankton assemblages in a semiarid wetland. *Hydrobiologia* DOI: 10.1007/s10750-009-0017.
- ROTT, E. 1981. Some results from phytoplankton counting intercalibrations. *Schweizerische Zeitschrift für Hydrologie* 43: 34-62.
- ROULET, N.T. 2000. Peatlands, carbon storage, greenhouse gases, and the Kyoto Protocol: prospects and significance for Canada. *Wetlands* 20: 605-615.
- RUIZ ZAPATA, M.B., PÉREZ GONZÁLEZ, A., DORADO, M., VALDEOLMILLOS, A., & DE BUSTAMANTE, I. 2001. Evolución climática en la submeseta Sur durante el Cuaternario. Las Tablas de Daimiel y las lagunas de Ruidera. Informe Final para la Fundación Ramón Areces. Madrid.
- SÁNCHEZ CARRILLO, S. & ALVAREZ COBELAS, M. 2001. Nutrient dynamics and eutrophication patterns in a semiarid wetland: the effects of fluctuating hydrology. *Water, Air and Soil Pollution* 131: 97-118.
- SANCHEZ-CARRILLO, S. & ANGELER, D.G. (eds.) 2010. *Ecology of threatened semi-arid wetlands: Long-term research in Las Tablas de Daimiel*. Springer Verlag, Berlin.
- SCHLESINGER, W.H. 1997 *Biogeochemistry. An analysis of Global Change*. 2nd edition. Academic Press. San Diego.
- VAN REEUWIJK, L.P. (ed.) 1987. *Procedures for soil analysis*. International Soil Reference and Information Centre. Wageningen, The Netherlands.
- VYMAZAL, J. 1994. *Algae and element cycling in wetlands*. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida.
- WESTLAKE, D.F. 1969. Macrophytes. En: R.A. VOLLENWEIDER (ed.) *A manual on methods for measuring primary production in aquatic environments*. pp. 25-33. Blackwell Scientific Publications. Oxford.