

Las marismas de marea andaluzas como sumidero y almacén de carbono orgánico

Elena Díaz-Almela¹, Nerea Piñeiro-Juncal^{1,2}, Montserrat Soler¹, Candela Marco-Méndez¹, E. Fay Belshe³, Carmen Leiva-Dueñas¹, Paul Lavery⁴, Santiago Giralt⁵ y Miguel Ángel Mateo^{1,4}.

RESUMEN:

En el marco del proyecto Life Blue Natura evaluamos la variabilidad horizontal de las reservas y flujos de carbono orgánico en las marismas del Odiel y Bahía de Cádiz. Los muestreos se centraron en captar la variabilidad en función de la influencia mareal (marisma baja, media y alta) diagnosticada por las bandas de vegetación. Se muestrearon 13 estaciones en cada una de las localidades, en un total de 34 catas de entre 21 y 259 cm de longitud y 24 muestras de biomasa. Las reservas medias de carbono orgánico en el primer metro de suelo de marisma saludable se estiman en $Stock_{1m}$ = 333 ± 74 (DE) t CO_2 ha⁻¹, pero los depósitos de carbono continúan en profundidad, y estimamos que las reservas podrían ser un 12-112% mayores. La Variabilidad espacial en la riqueza $(\%C_{org})$ y densidad de C_{org} no era significativa entre localidades (ANOVA anidada), pero sí entre estaciones con distinta influencia mareal (p< 10-4). % C_{org} y Densidad C_{org} eran mayores en la marisma media que en las demás (p< 10-4). Además, la Densidad C $_{\rm org}$ era mayor en los lodazales de marisma baja no vegetada, que en la marisma baja vegetada y la marisma alta ($p < 10^{-3}$ y 10^{-4}). Con sedimentos mas jóvenes, las marismas inundadas diariamente, y en especial la marisma media, son el reactor de secuestro de carbono más intenso del ecosistema, tanto a escala secular (flujo_{100a}= 2,24 ± 0,47 (DE) t CO₂ ha⁻¹ año⁻¹), como a la del periodo que tarda en acumular el primer metro (flujo $_{lm}$ = 1,17 ± 0,14 (DE) t CO $_2$ ha $^{-1}$ año $^{-1}$ en 360 y 494 años, en Odiel

¹ Centro de Estudios Avanzados de Blanes (CSIC), 17300 Blanes, Spain

² Departamento de Edafoloxía e Química Agrícola, Universidad de Santiago de Compostela, 15782 Santiago de Compostela, Spain

³ Leibniz Center of Tropical Marine Research, Fahrenheitstraße 6, 28359 Bremen, Germany

⁴ Center for Marine Ecology Research, Edith Cowan University, Joondalup, Australia

⁵ Instituto de Ciencias de la Tierra Jaume Almera, Barcelona, Spain

y los Toruños, respectivamente). En la marisma media el $Stock_{lm}$ era (442 ± 173 (DE) t CO_2 ha⁻¹) mayor que en baja no vegetada (343 ± 79 (DE) t CO_2 ha⁻¹), la baja vegetada por S. maritima (259 \pm 40 (DE) t CO₂ ha⁻¹) y la alta (270 \pm 77 (DE) t CO₂ ha-1), donde fueron similares entre sí. El Stock_{lm} de la única estación submareal (caño) era similar al de la marisma baja (249 ± 31 (DE) t CO₂ ha⁻¹). Sin embargo, el carbono orgánico en las marismas altas es más antiguo, producto de la maduración de la materia orgánica acumulada durante milenios, y de la compactación del suelo, que hace que el intervalo temporal abarcado en las reservas del primer metro de suelo sea mayor. El C_{org} se acumuló en el suelo de la marisma a una tasa promedio de flujo $_{100a}$ = 1,3 ± 0,9 (DE) t CO $_2$ ha $^{-1}$ año $^{-1}$, aunque dicha tasa varía desde valores negativos en 2 estaciones donde se ha detectado erosión, hasta 2,6 t CO₂ ha⁻¹ año⁻¹ en la marisma media del Odiel. Extrapolando con las cartografías de marismas, estimamos que las marismas saludables de Odiel y Cádiz contienen 2.7 ± 0.1 (DE) Mt de CO₂ en sus suelos y que han secuestrado unas 8.1 ± 0.3 kt CO₂ al año en los últimos 100 años. Las marismas de Andalucía tendrían un $Stock_{lm}$ 19,5 ± 5,6(DE) Mt CO₂, y en el último siglo han secuestrado 68,6 ± 36,4(DE) kt CO₂ por año.

Palabras clave: carbono azul, cambio climático, mitigación, marismas de marea, Marismas del Odiel, Bahía de Cádiz.

ABSTRACT:

Within the framework of the European Life Blue Natura project, we have evaluated the organic carbon stocks and fluxes in the Andalusian saltmarshes of Marismas del Odiel and Bahía de Cádiz natural parks. We have explored the horizontal variability of these organic carbon stocks due to tidal influence (low, medium and high marsh), diagnosed from vegetation, and, in the case of Odiel. For this, 13 stations and 34 sediment cores/profiles, between 21 and 259 cm in length, were sampled as well as 24 biomass samples. The average Stock_{1m} has been estimated in 333 ± 74(SD) t CO₂ ha⁻¹, but as the soil organic carbon continues deeper, we estimate that the total carbon reserves could be 12% to 112% times higher. Organic carbon accumulated in the marsh soil at an average rate of 1.3 ± 0.9 (SD) t CO₂ ha⁻¹ year⁻¹ during the last century, although it ranges from negative values in 2 stations where erosion was detected up to 2.6 t CO₂ ha⁻¹ year⁻¹ in the mid-marsh of the Odiel marine estuary area. The spatial variability in richness (%C_{org}) and density of C_{org} was not significant between localities (nested ANOVA), but it was significant between stations with different tidal influence $(p < 10^{-4})$. % C_{org} and C_{org} Density were higher in the middle marsh than in the others (p< 10⁻⁴). Furthermore, the C_{org} Density was higher in the un-vegetated low marsh mudflats, than in the vegetated low marsh and high marsh ($p < 10^{-3}$ and 10⁻⁴). The daily flooded saltmarsh (especially the medium marsh) has the youngest sediments and seems to be the most intense carbon sequestration reactor in this ecosystem, both at a secular scale (flux_{100vr} = 224 ± 0.47 (SD) t CO₂ ha⁻¹ year⁻¹), and in the period required to accumulate the first soil meter (flux_{lm} = $1.17 \pm 0.14(SD)$ t CO₂ ha⁻¹ year⁻¹ in 360 and 494 years at Odiel and Los Toruños, respectively).

Stock_{1m} was larger in the mid marsh $(442 \pm 173(\text{SD}) \text{ t CO}_2 \text{ ha}^{-1})$ than in non-vegetated low $(343 \pm 79(\text{SD}) \text{ t CO}_2 \text{ ha}^{-1})$, the low vegetated by *S. maritima* $(259 \pm 40(\text{SD}) \text{ t CO}_2 \text{ ha}^{-1})$ and the high $(270 \pm 77(\text{SD}) \text{ t CO}_2 \text{ ha}^{-1})$, where they present similar values. The sedimentary organic carbon in high saltmarsh was older, as it was the product of diagenetic processes on organic matter over millennia, as well as soil compaction, which widens the time interval covered in the reserves of the first soil meter. Based on published cartographies of Andalusian saltmarshes, we have estimated that the Stock_{1m} in the wild saltmarshes of Odiel and Cádiz stock are 2.7 \pm 0.1(SD) Mt CO₂ in the topmost meter and the flux_{100yr} 8.1 \pm 0.3 kt CO₂ year⁻¹ as organic compounds. We estimate that the Andalusian marshes stock in their top soil meter 19.5 \pm 5.6(SD) Mt CO₂, and that in the last century they would have buried 68.6 \pm 36.4(SD) kt of CO₂ per year, as organic matter.

Keywords: blue carbon, climate change, mitigation, saltmarshes, Odiel, Cadiz Bay.

1. INTRODUCCIÓN

Las marismas de marea son humedales costeros que se ubican en las zonas intermareales, a menudo en estuarios de ríos. Son ambientes de influencia marina afectados por los cambios de marea e influencia terrestre, con aportes de agua dulce, tanto a nivel subterráneo como superficial, generando un medio salobre. Están cubiertas por plantas herbáceas y arbustivas halófilas, pero no por árboles halófilos, que forman otro ecosistema diferente, aunque con muchas características comunes: los manglares.

Además, las marismas secuestran y fijan CO₂ debido a, principalmente, tres razones:

- 1. Alta productividad primaria neta (PPN). Las marismas se encuentran entre los ecosistemas más productivos, con una PPN media anual entre 1000 y 2000 g m $^{-2}$ año $^{-1}$ (Sharitz y Penning 2006). Se trata de ecosistemas netamente autotróficos, es decir, que fijan fotosintéticamente el CO $_2$ como materia orgánica, a un ritmo superior al que lo re-oxidan mediante la respiración (Duarte y Cebrián, 1996, Duarte *et al.*, 2005).
- 2. Una dinámica físico-química con predominio de la deposición sedimentaria, como consecuencia del balance entre la dinámica mareal y la floculación y sedimentación de arcillas en suspensión, debida al contacto entre aguas continentales, dulces y marinas, saladas. Estas arcillas arrastran en su sedimentación, materia orgánica disuelta y en suspensión, sepultando la materia orgánica vegetal existente en el fondo (Jordán-López, 2006).
- 3. <u>Suelos anaeróbicos</u>: el suelo de las marismas retiene gran cantidad de sedimentos finos, lo cual, junto al encharcamiento mareal, produce condiciones persistentes de anoxia. Esto hace que la descomposición de la materia orgánica acumulada sea muy lenta, manteniéndola almacenada durante cientos o incluso miles de años (Chmura *et al.*, 2003).

En 2013 el IPCC incorporó metodologías para incluir acciones de restauración y degradación sobre marismas de marea en los inventarios nacionales de emisiones y sumideros (IPCC 2013, 2014). Además, el programa de verificación de estándares de carbono

(VCS por sus siglas en inglés), incluyó dos metodologías para proyectos de compensación mediante la conservación y restauración de marismas (Emmer et al., 2015). Por último, en el acuerdo climático de París se reconoció la importancia de los ecosistemas sumidero de carbono orgánico (C_{org}), alentando a los países participantes a protegerlos y potenciarlos (UNFCCC, 2018). Todos estos avances han promovido el interés por añadir los ecosistemas de carbono azul a los inventarios nacionales (IPCC, 2013) y diseñar mecanismos que permitan su uso en estrategias de mitigación del cambio climático (Barbier et al., 2011; Constanza, 2008; Nellemann et al., 2009), empezando por los mercados voluntarios de créditos de carbono. La Junta de Andalucía es pionera en este enfoque, ya que aprobó en 2018 la Ley de Medidas Frente al Cambio Climático y para la Transición hacia un Nuevo Modelo Energético en Andalucía, donde se hace mención explícita a estos ecosistemas como elegibles para proyectos de compensación (BOJA 199 del 15 de octubre de 2018).

Las marismas españolas constituyen uno de los hábitats que han experimentado mayores cambios de extensión durante los años cincuenta y sesenta, por urbanización turística, desecación para agricultura, y explotación salinera. A principios de los años ochenta hubo los primeros intentos de protección y revalorización de los humedales españoles; al principio, por su papel como refugio de aves (convenio RAMSAR). Se estima que en Andalucía se han perdido más de 120 humedales, tanto costeros como continentales (aprox 50% del total), mediante la desecación de más de 130.000 ha de superficie inundable (Plan de Humedales Andaluz). Vasquez-Loarte *et al.*, (2017) ampliaron estas estimas para Andalucía, mediante un minucioso análisis de la serie de fotografías aéreas de 1956 a 2013.

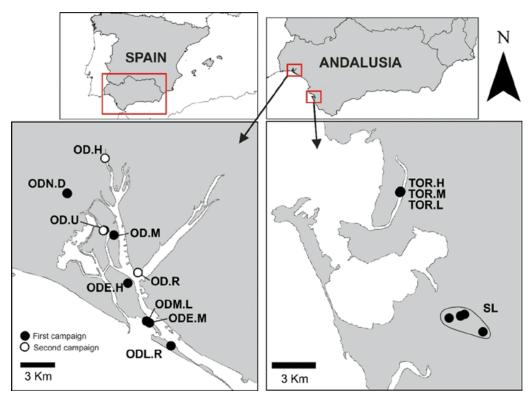
En Andalucía, las marismas de marea se encuentran en la costa atlántica, ya que en el Mediterráneo y el mar de Alborán las mareas son muy débiles. En estas costas también hay marismas costeras, aunque la ausencia de dinámica mareal las hace menos extensas y con características diferentes. Todas ellas proveen numerosos servicios ecosistémicos, entre los que destacan la protección costera frente al oleaje y la elevación del nivel del mar, la purificación del agua, ser criadero y refugio para muchas especies, algunas de interés pesquero, ser intensos sumideros de carbono a largo plazo y un recurso paisajístico y de diversas materias primas (Barbier *et al.*, 2011).

Con el fin de avanzar en el conocimiento sobre las marismas andaluzas como sumideros de carbono presentamos el inventario del almacén y flujo de carbono de las marismas de marea de los Parques Naturales de la Bahía de Cádiz y Marismas del Odiel. Este inventario está basado en los muestreos y cartografías realizados en el marco del proyecto Life Blue Natura (acciones A1 y A3). Hemos extendido los valores medios obtenidos en esas dos localidades a la extensión total de marismas de marea de Andalucía evaluada recientemente por Vasquez-Loarte (2017) para obtener unas estimas globales de reservas y flujos de carbono.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

Esquema y lugar de muestreo

El muestreo se llevó a cabo en dos marismas: El Odiel y las marismas de la bahía de Cádiz (Fig. 1). Las marismas Odiel son un estuario en forma de barra costera, en la confluencia de las desembocaduras de los ríos Tinto y Odiel, que crece hacia el este, paralelo a la costa, por los efectos combinados de los sedimentos transportados por estos ríos y la corriente costera dominante (Borrego, 1997/2017). La mayor parte de su superficie es una marisma



<u>Fig. 1</u>: Localización de las estaciones de marismas y salinas muestreadas en las Marismas del Odiel (izquierda) y la Bahía de Cádiz (derecha), en 2016 y 2018.

no transformada (Cartografía temática de la marisma de Odiel, (Life Blue Natura, 2018b). Las marismas de la Bahía de Cádiz están formadas principalmente por el transporte de sedimentos terrestres en este área, cuya costa es perpendicular a la corriente principal hacia el este, aunque también hay entradas de algunos ríos pequeños (Gracia et al., 2017). Más de la mitad de la superficie de la marisma de la Bahía de Cádiz ha sido tradicionalmente explotada como salinas artesanales. Hoy, solo un tercio de esa superficie todavía se está explotando para obtener sal. Aproximadamente otro tercio se ha transformado para la acuicultura y el resto se ha abandonado, con diversos grados de restauración de la influencia de las mareas (Cartografía temática de la marisma de la Bahía de Cádiz, entregable en A1.2). Sólo el 26% del espacio de la Bahía de Cádiz consiste en marisma de marea sin transformar. La mitad se encuentra hacia el norte, en el estuario del río San Pedro, en la zona llamada Los Toruños.

Los muestreos se realizaron en dos misiones de campo en marismas andaluzas (Fig. 2). La primera tuvo lugar en octubre de 2016 mientras que la segunda se llevó a cabo en noviembre de 2018. Los objetivos principales eran capturar la variabilidad espacial natural de las reservas y flujos de carbono en ambas marismas, en función, principalmente, del gradiente de inmersión mareal (caño sumergido, marisma baja, media y alta), definidos por las diferentes bandas de vegetación dominante. Además, en las marismas del Odiel, las estaciones de muestreo se distribuyeron a lo largo de las secciones marinas, intermedias y continentales del estuario que, al crecer hacia el sureste a medida que crece la barra de arena, forma un gradiente de influencia de agua marina, que se correlaciona con el de antigüedad de la marisma (Borrego 1997/2017). Sin embargo, no pudimos hacer un muestreo factorial completo (es decir, muestrear cada grado de exposición mareal en cada sección del estuario), porque ese esfuerzo de muestreo estaba fuera de nuestro alcance en este estudio; de modo que muestreamos cada tipo de influencia mareal en la sección del estuario donde era más abundante. Las estaciones donde se midió la variabilidad natural de flujos y reservas de

TOR.L-C ODM.L-C ODM.L ODE.M ODE.H TOR.H OD.M OD.U ODU.H ODN.D-V

ARTÍCULOS

Fig. 2: Aspecto *in situ* de las estaciones de marisma natural muestreadas.

carbono fueron para captar la variabilidad natural de los flujos (Tabla 1). En cada estación se tomaron manualmente de 1 a 4 testigos o perfiles de sedimento de entre 21 y 259 cm de potencia. En total, en 2016 y 2018, muestreamos 13 estaciones en las 2 localidades (bahía de Cádiz y marismas del Odiel), 33 testigos y 2 perfiles verticales, así como 24 muestras de biomasa. Se pueden consultar mas detalles sobre las estaciones de muestreo y los métodos de muestreo y submuestreo aplicados en el informe de muestreos del proyecto Life Blue Natura (Life Blue Natura, 2018a).

<u>Tabla 1</u>: Estaciones de marisma muestreadas en el proyecto Life Blue Natura para estimar las reservas y flujos de carbono orgánico en marismas de marea naturales.

Marisma	ZEC Natura 2000	Sitio	Coordenadas	s geográficas	Categoria	Código
		El Manto	37° 10,460`N	6°55,865'W	Marisma baja vegetada por <i>Spartina</i> <i>maritima</i> , saludable Estuario marino	ODM.L
		El Manto	37° 10,460`N	6°55,865'W	Marisma baja no vegetada Estuario marino	ODM.L-C
		El Manto	37° 10,373'N	6° 55,690'W	Marisma media, saludable, vegetación dominada por <i>Sarcocornia spp</i> . Estuario marino	ODE.M
		El Saltés	37° 12,228'	6° 57,081'	Marisma alta, saludable, vegetación diversa Estuario intermedio	ODE.H
El Odiel	ES0000025	Aljaraque	37.27347°N	7.01543°W	Marisma alta, saludable, vegetación dominada por <i>Spartina densiflora</i> Estuario continentalizado	ODN.D
		Manzorrales	37°18'08.2"N	6°58'45.6"W	Marisma alta, saludable, vegetación dominada por Arthrocnemum macrostachyum Estuario continentalizado	OD.H
		Canal Mojarrera	37°14'43.0"N	6°58'37.4"W	Caño ancho de marisma, submareal	OD.U
		Isla de Enmedio	37°14'41.0"N	6°58'39.4"W	Marisma media-alta, vegetación dominada por <i>S. densiflora</i> Estuario intermedio	OD.MH
		Isla de Enmedio	37°14'41.4"N	6°58'39.4"W	Marisma media-baja, vegetación dominada por <i>Sarcocornia spp</i> . Estuario intermedio	OD.M
		Los Toruños - río San Pedro	36° 32,923'N	6° 12,597'W	Marisma baja vegetada por <i>S. densiflora</i> , saludable Estuario intermedio	TOR.L
Cádiz	ES0000140	Los Toruños - río San Pedro	36° 32,923'N	6° 12,597'W	Marisma baja no vegetada Estuario intermedio	
		Los Toruños - río San Pedro	36° 32,923'N	6° 12,600'W	Marisma media-baja, saludable, dominada por <i>Sarcocornia spp</i> . Estuario intermedio	TOR.M
		Los Toruños - río San Pedro	36° 32,919'N	6° 12,613'W	Marisma media-alta saludable, vegetación diversa Estuario intermedio	TOR.H

Los submuestreos de los testigos, análisis de laboratorio y análisis de datos se realizaron del mismo modo que para las praderas marinas, tal como se explica en el artículo de Piñeiro-Juncal et al. (2019) de este monográfico. También se expone, con mas detalle, en el informe de resultados del estudio de stock y flujos sobre marismas del proyecto Life Blue Natura (Diaz-Almela et al., 2019). Básicamente, se midió la densidad bruta del sedimento (DB) y el porcentaje en peso de carbono orgánico (% $C_{\rm org}$). A partir de ambos parámetros se estimó la densidad de carbono orgánico (densidad $C_{\rm org}$) de los suelos a distintos niveles de cada testigo. Al menos un testigo por estación fue analizado cada 2-4 cm, y datado mediante análisis de los cambios verticales en la radiactividad natural de $^{210}{\rm Pb}$ en su parte superficial, y $^{14}{\rm C}$ (AMS) total del sedimento en un punto intermedio y en la base del testigo, mientras que los otros testigos de la estación, usados como réplicas, fueron submuestreados en sólo 7 a 14 niveles y no fueron datados.

Las reservas totales de carbono orgánico en el primer metro de suelo (Stock_{1m}) se obtuvieron integrando la densidad C_{org} en cada sección de cada testigo, entre 0 y 100 cm. Si algún testigo no alcanzaba el metro, se extrapolaba el % C_{org} y la densidad bruta hasta los 100 cm, aplicando valores de densidad a los centímetros restantes en función de las tendencias en el % C_{org} y la DB, si los tuvieren, y si no, aplicándole el valor promedio de densidad C_{org} medida en el testigo. Estas reservas se expresan en toneladas de CO_2 por hectárea (t CO_2 ha⁻¹), que se corresponden con 1 crédito de carbono en el mercado internacional de GEI. Para transformar los pesos de Carbono elemental a CO_2 . Multiplicamos por el factor 3,67, basado en la relación de peso molecular del átomo de C y la molécula de CO_2 .

Las dataciones permitieron obtener un modelo de edad a lo largo de cada testigo de suelo y estimar a partir de él las tasas de acreción sedimentaria (TAS, en cm por año) para cada nivel del testigo. Así calculamos las ${\rm TAS}_{\rm 100a}$ media en el último siglo, así como su desviación estándar, que estima la variabilidad temporal de la TAS en los últimos 100 años. Los flujos de ${\rm C}_{\rm org}$ en el último siglo (Flujo $_{\rm 100}$ ${\rm C}_{\rm org}$, en tCO $_{\rm 2}$ ha $^{\rm -1}$ año $^{\rm -1}$) para cada estación se estimaron en los testigos datados, calculando la reserva de carbono orgánico acumulada en los centímetros de testigo sedimentados en los últimos 100 años, y dividiéndola por 100. El flujo ${\rm C}_{\rm org}$ en el primer metro de suelo (Flujo $_{\rm 1m}$ ${\rm C}_{\rm org}$), se estimó dividiendo el $\mathit{Stock}_{\rm 1m}$ ${\rm C}_{\rm org}$ del testigo datado por el tiempo que ha tardado en sedimentar ese metro de suelo.

Análisis estadísticos

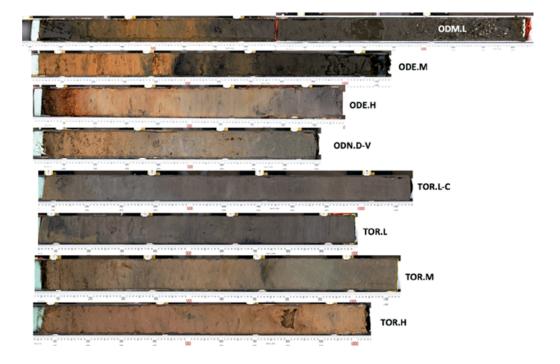
Se calcularon las medias y desviaciones estándar de DB, %Corg y Dens C_{org} en el primer metro de suelo, promediando los valores obtenidos en todas las muestras del primer metro de los 3 testigos de cada estación. También se calculó la media y desviación estándar del $Stock_{lm}$ C_{org} de cada estación, a partir de los valores obtenidos en cada testigo de suelo.

Para analizar la variabilidad en la DB, %Corg y densidad Corg entre tipos de marisma (lodazales no vegetados, marisma baja vegetada, media y alta), y con la profundidad del suelo, realizamos un análisis de la varianza de dos factores. En las marismas Odiel, seleccionamos una estación por cada tipología de cada localidad. En Odiel las seleccionamos entre las estaciones que se encuentran en la parte mas marina del estuario, mas parecidas a las condiciones del lugar de muestreo de la Bahía de Cádiz. Solo se utilizaron los datos del testigo principal datado, promediando los valores de cada submuestra a intervalos de 10 cm, de modo que se pudieran comparar niveles entre testigos. Previamente realizamos una ANOVA anidada para comparar la variabilidad horizontal entre estuarios (Bahía de Cádiz y marismas del Odiel), para determinar si se podían usar las estaciones de la misma tipología de marisma de cada estación, como réplicas.

3. RESULTADOS

Los testigos de sedimento de las marismas naturales, con distintos grados de inundación, mostraban diferencias de color, con tonalidades gris oscuro a negro predominando en la marisma baja, tanto de las marismas del Odiel como de Bahía de Cádiz, mientras que, en la marisma media, y sobre todo en la marisma alta, aparecían tonos marrones y grises más claros (Fig. 3). Los testigos tomados en el caño de marea tenían el sedimento aún mas oscuro. Los sedimentos eran finos, predominando la fracción menor de 0,063mm (limos y arcillas), que constituían entre el 61% y el 96% del volumen total de los sedimentos.

Fig. 3: Perfiles de hemicores en marisma baja, media y alta, en las marismas del Odiel (códigos que empiezan por OD) y en Los Toruños (bahía de Cádiz, códigos que empiezan por TOR).



Canal submareal:

Los bancos de sedimentos submareales poco profundos en el canal de la Mojarrera (OD.U) tenían la densidad bruta menor de todas las estaciones (DB, Tabla 2). El porcentaje de carbono orgánico ${}^{0}\!\!\!/ C_{\rm org}$ era medio y la densidad de $C_{\rm org}$ era baja (Fig. 4, Tabla 2). Las reservas (249,1 \pm 30,9 t CO $_{2}$ ha⁻¹; Fig. 5, Tabla 2) eran similares a las encontradas en la marisma baja vegetada (ODM.L, TOR.L).

Marisma baja:

Los lodazales no vegetados en la marisma baja de ambas localidades (TOR.L-C y ODM.L-C) están formados por sedimentos relativamente recientes, con DB y %C $_{\rm org}$ medios (Tabla 2) , que generaban densidades de C $_{\rm org}$ medias a altas (Fig. 4, Tabla 2). En consecuencia, en ODM.L-C encontramos alta reserva de carbono en el primer metro de suelo ($Stock_{\rm lm}=398,2\pm61,5$ (DE)), similar a la reserva de carbono en las marismas medias ODE.M y TOR.M (Fig. 5, Tabla 2). La estación ODM.L-C tenía altas tasas de acreción sedimentaria en el último siglo (TAS $_{100a}=3,2\pm1,1$ (DE) mm año-1) y flujos de carbono orgánico relativamente altos (Flujo $_{100a}=1,1$ (DE) t CO $_2$ ha-1 año-1; Fig. 5, Tabla 2). En cambio, en el lodazal de marisma baja de Los Toruños (TOR.L-C), la variación de actividad del 210 Pb en los 50 cm superiores de sedimento indica que este lodazal está actualmente

<u>Tabla 2</u>: Estimas de las medias y desviaciones estándar (DE) de las reservas de carbono orgánico en el primer metro, de la tasa de acreción sedimentaria y del flujo de carbono orgánico a corto plazo (100 años) y a largo plazo (1000 años) hacia el suelo, expresados en toneladas de CO₂ por hectárea (y año).

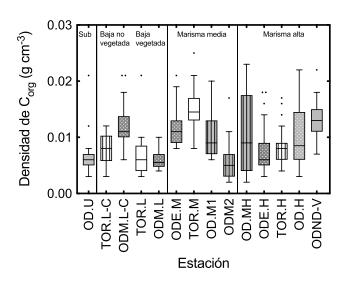
Estuario	Tipo	Código estación	Reserva biomasa aérea	DE	Reserva 1m suelo	DE	TAS _{100a}	DE	Flujo _{100a}	DE	Flujo _{1m}	DE
			t CO ₂	ha ⁻¹	t CO ₂	ha ⁻¹	cm ai	ño ⁻¹		t CO ₂ ha	a ⁻¹ año ⁻¹	
	Marisma alta	ODN.D-V	37,2	14,5	400,6	113,9	13,75 mm	0,02	0,61	-	0,10	-
	Marisma alta	OD.H	21,5	10,3	198,8	32,5	0,10	0,05	0,57	-	0,17	-
	Marisma alta	ODE.H	19,0	7,6	264,4	141,7	0,29	0,14	0,67	-	0,18	-
	Media-alta	ODM.H	44,8	22,3	243,9							
Odiel	Media-baja	OD.M	-		265,8	193,7	Erosión					
	Media	ODE.M	13,1	7,6	319,7	113,8	0,96	0,70	2,57	-	1,27	-
	Lodazal bajo	ODM.L-C	0		398,2	61,5	0,32	0,11	1,06	-	0,67	-
	Marisma baja	ODM.L	24,7	8,4	286,9	123,0	0,27	0,06	0,38	-	0,51	-
	Submareal	OD.U	0		249,1	30,9						
	Media-alta	TOR.H	9,9	6,7	241,3	116,0	Áridos añadidos					
Bahía	Media-baja	TOR.M	18,8	4,7	563,7	61,3	0,42	0,13	1,91	1	1,07	-
de Cadiz	Lodazal bajo	TOR.L-C	0		287,0	104,1	Erosión					
	Marisma baja	TOR.L	6,0	2,2	230,5	87,1	0,21	0,08	0,43	1	0,38	-
Medias	Alta (TOR.H, ODE.H, OD.H, ODN.D-V, ODM.H)		26,5	14,2	269,8	76,9	0,20	0,09	0,62	0,05	0,17	0,06
	Media (TOR.M, ODE.M)		16	4,0	441,7	172,5	0,69	0,38	2,24	0,47	1,17	0,14
	Lodazal bajo (TOR.L-C ODM.L-C)		0		342,6	78,6	Negativa a 0,32		Emisión a 1,06		Emisión a 0,42	
	Marisma baja (TOR.M, ODM.L)		15,4	13,2	258,7	39,9	0,24	0,05	0,39	0,06	0,45	0,09

bajo la influencia de procesos erosivos, por lo que no pudimos estimar el flujo de carbono del último siglo. Esta estación muestra una reserva de carbono ligeramente menor (C_{org} $stock_{lm} = 287,0 \pm 104,1$ (DE), Tabla 2, Fig. 5) que su estación homóloga en Odiel (ODM.L-C), y que la marisma media de su misma localidad, TOR.M, pero similar a las reservas en el primer metro de marisma baja vegetada (TOR.L), o marisma alta (TOR.H).

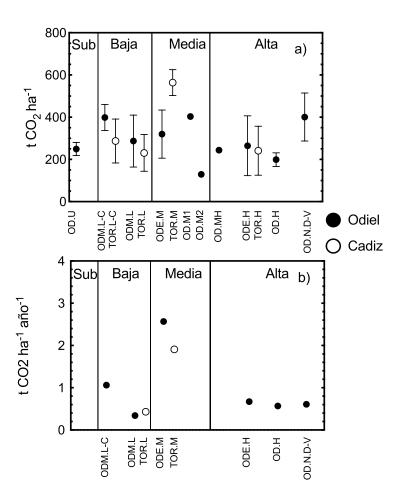
Los lodazales de marisma baja vegetados con *Spartina maritima* (ODM.L y TOR.L) tenían DB más bajas que en los lodazales sin vegetación (Tabla 2). Pero pese a la existencia de vegetación, en ODM.L el sedimento tenía un % $C_{\rm org}$ y una densidad $C_{\rm org}$ (Tabla 2, Fig. 4) menores que en el lodazal no vegetado adyacente (ODM.L-C) y, en consecuencia, reservas de carbono a 1 metro también ligeramente inferiores (ODM.L: $Stock_{\rm lm} = 287 \pm 123$ (DE) t

 $\rm CO_2$ ha⁻¹, Tabla 2, Fig. 5), aunque similares a la de Los Toruños (TOR.L: $\it Stock_{1m} = 230,5 \pm 87,1 \ (DE)$ t $\rm CO_2$ ha⁻¹, Tabla 2 y Figs. 4 y 5). Las tasas de acreción recientes de ODM.L (TAS_{100a} = 2,7 ± 0,6 (DE) mm año⁻¹, Tabla 2) eran similares a las de ODM.L-C, pero la menor densidad de $\rm C_{org}$, arrojaba flujos de carbono recientes más bajos en ODM.L (flujo_{100a} = 0,34 t $\rm CO_2$ ha⁻¹ año⁻¹; Fig. 5, Tabla 2) que en ODM.L-C (flujo_{100a} = 1,06 t $\rm CO_2$ ha⁻¹ año⁻¹; Fig. 5, Tabla 2).

Fig. 4: Cajas de Tukey de la distribución de los datos de densidad de carbono en los testigos de sedimento de cada estación de marisma. Las cajas blancas corresponden a estaciones de la bahía de Cadiz (Los Toruños), y las cajas grises a estaciones del Odiel. Las cajas lisas representan las estacione consideradas "saludables", a partir de las cuales se han escalado las reservas y flujos medios medios de carbono en los distintos tipos de marisma (submareal, lodazales de marisma baja no vegetados, marisma baja vegetada con S. maritima, marisma media y marisma alta). Las cajas de Tukey con rayas verticales no se han usado para el escalado, porque han sufrido algún tipo de degradación o tratamiento: erosión (TOR.L-C, OD.M), mezcla con áridos (TOR.H), invasión de S. densiflora (ODU.H).



<u>Fig. 5</u>: Variabilidad en a) *stocks* de carbono orgánico en el primer metro de suelo y b) flujos de carbono en el último siglo, expresados en toneladas de CO_2 por hectárea, y toneladas de CO_2 enterradas por hectárea y año. Las barras representan la desviación standard. Los puntos negros y blancos representan las estimas medias de *stock* o las estimas puntuales de flujo de carbono al sedimento en las estaciones de Odiel y bahía de Cadiz (Los Toruños), respectivamente.



Sin embargo, la variabilidad temporal de TAS_{100a} en ODM.L-C triplicaba la de ODM.L (Coeficiente de Variación CV: 48% y 18%, respectivamente), indicando una menor estabilidad en la sedimentación. La tasa de acreción del primer metro en el lodazal no vegetado ODM.L-C ($TAS_{1m} = 1,4$ mm año-¹, Tabla 2) es la mitad que en el vegetado ODM.L ($TAS_{1m} = 3,3$ mm año-¹, Tabla 2). En consecuencia, a pesar de la menor riqueza y densidad de C_{org} en ODM.L, los flujos de carbono a largo plazo eran similares entre los lodazales, vegetados o no por *S. maritima*: (flujo_{1m} C_{org} ODM.L-C = 0,67 t CO_2 ha-¹ año-¹; flujo_{1m} C_{org} ODM.L = 0,51 t CO_2 ha-¹ año-¹). De este modo, la reserva de carbono en el primer metro de suelo de ODM.L se había acumulado en la mitad de tiempo (307 años) que en el de ODM.L-C (693 años).

El perfil de 210 Pb de los primeros 50 cm de sedimento de TOR. Lindica que, a diferencia del lodazal no vegetado adyacente, la acumulación de sedimentos sí estaba teniendo lugar en las manchas de *S. maritima*, produciendo tasas de acreción positivas más homogéneas, que para el siglo pasado no eran significativamente menores que las de ODM. L (TAS $_{100a}$ TOR. L= 1,9 \pm 0,8 (DE) mm año-¹; Tabla 2), aunque a la escala del metro, sí lo eran (TAS $_{\rm lm}$ = 1,3 mm año-¹, Tabla 2). Como consecuencia, los flujos de carbono en los últimos 100 años en TOR. L eran similares (flujo $_{100a}$ C $_{\rm org}$ = 0,43 t CO $_2$ ha-¹ año-¹; Fig. 5, Tabla 2) a los de su homólogo de Odiel, mientras el flujo a largo plazo era ligéramente inferior (flujo $_{100a}$ C $_{\rm org}$ = 0,38 t CO $_2$ ha-¹ año-¹; Fig. 5, Tabla 2).

La reserva de carbono en el compartimento de la biomasa aérea era de entre 6 y 25 t CO_2 ha⁻¹ en TOR.L y ODM.L, respectivamente (Tabla 2), siendo la media para los lodazales vegetados con *S. maritima* de 22 ± 19 (DE) t CO_2 ha⁻¹ (Tabla 3).

Efecto	DB				%C _{org}				Densidad C _{org}			
	GL	SC	MC	<i>p</i> -valor	GL	SC	MC	<i>p</i> -valor	GL	SC	MC	<i>p</i> -valor
Tipo de marisma	3	6,43	2,14	<0,0001	3	15,34	5,11	<0,0001	3	8,40	2,80	<0,0001
Profundidad de suelo	10	9,58	0,96	<0,0001	10	7,44	0,74	0,002	10	0,25	0,03	0,9982
Interacción	30	0,87	0,03	0,9998	30	2,65	0,09	0,994	30	1,92	0,06	0,994
Residuo (error)	44	4,64	0,11		44	9,52	0,22		44	6,86	0,16	
Total	87	21,52			87	34,95			87	17,43		

Marisma media:

En las dos localidades estudiadas, las estaciones de marisma media saludable mostraban baja DB pero altos ${}^{9}\!\!\!/ \mathrm{C}_{\mathrm{org}}$ y densidad $\mathrm{C}_{\mathrm{org}}$ (Fig. 4, Tabla 2), así como alto $\mathit{Stock}_{\mathrm{1m}}$ (TOR.M: 564 ± 62 (DE) t CO_2 ha⁻¹ y ODE.M: 320 ± 114 (DE) t CO_2 ha⁻¹, Tabla 2, Fig. 5). El $\mathit{stock}_{\mathrm{1m}}$ medio en el primer metro de marisma media saludable era el mas alto de todas las tipologías (442 ± 173 (DE) t CO_2 ha⁻¹, Tabla 2). Las tasas de acreción y los flujos de carbono orgánico mas altos de las marismas saludables tenían lugar en las estaciones de marisma media, tanto a escala secular (flujo $_{100a}$ = 1,9 y 2,6 t CO_2 ha⁻¹ año⁻¹ en TOR.M y ODE.M,

respectivamente, Tabla 2, Fig. 5; media: 2.2 ± 0.5 (DE) t CO₂ ha⁻¹ año⁻¹, Tabla 3), como en el primer metro (flujo_{1m}: 1,1 y 1,3 t CO₂ ha⁻¹ año⁻¹ en TOR.M y ODE.M, respectivamente, Tabla 2, Fig. 5; media: $1,17 \pm 0,14$ (DE) t CO₂ ha⁻¹ año⁻¹). Los sedimentos de la marisma media tenían una antigüedad similar (494 y 360 años a 1 metro para TOR.M y ODE.M, respectivamente) a los de la marisma baja, y una densidad bruta también similar.

La reserva de carbono orgánico en la biomasa aérea de TOR.M y ODE.M era baja, entre 19 y 13 t $\rm CO_2$ ha⁻¹, respectivamente, con un valor medio de 16,5 ± 4,2 (DE) t $\rm CO_2$ ha⁻¹ (Tabla 2).

La estación de marisma media situada en el estuario intermedio del Odiel (Isla de En medio, OD.M) mostraba grandes diferencias en sus 2 testigos de sedimento: en OD.M1, el %Corg, la densidad Corg y la reserva total de Corg en el primer metro de suelo (1,75 ± 1,27 (DE)%; 0,011 ± 0,004(DE) g C cm⁻³ y 402,7 t CO₂ ha⁻¹), eran similares a las de ODE.M (Figs. 4 y 5). En cambio, en el testigo OD.M2, las 3 variables (%Corg = 0.60 ± 0.54(DE)%; Densidad Corg = 0.005 ± 0.004(SD) g C cm⁻³ y 128.8 t CO₂ ha⁻¹) tenían valores mas bajos que en ODE.M (Figs. 4 y 5). La densidad bruta del suelo en OD.M2 (1,1 ± 0,3 (DE) g cm⁻³) era mayor que en OD.M1 (0,8 ± 0,4(DE) g cm⁻³), y ambas eran mayores que en ODE.M a igual profundidad (87cm: BD= 0,5 ± 0,1 (DE) g cm⁻³, ANOVA: p< 10⁻⁴ + tests de Tukey p< 0,01 a 10⁻⁴). Además, el carbono del testigo datado (OD.M2) era mucho más antiguo que los de ODE.M y TOR.M (3653 años a 80 cm de profundidad). El perfil de 210 Pb de las capas superiores de OD.M2 indicaba que actualmente hay una dinámica de erosión. La riqueza de carbono orgánico (%Corg) de los dos testigos de OD.M solo era similar a la de ODE.M únicamente en los 4 a 10 cm superiores (donde se encuentran las raíces y rizomas de las plantas vivas) y disminuía considerablemente por debajo de esa profundidad.

El testigo OD.MH, extraído a pocos metros de OD.M, pero clasificado inicialmente como marisma alta, por su vegetación predominante de la exótica *Spartina densiflora*, tenía una DB, ${}^{0}\!\!/\!\!\mathrm{C}_{\mathrm{org}}$ y densidad de $\mathrm{C}_{\mathrm{org}}$ (Tabla 2, Fig 4) similares a las de ODE.M, pero esta riqueza en carbono caía entorno a los 20 cm, de modo que las reservas en el primer metro de suelo eran mas similares a las de marisma baja y alta (Stock_{1m} : 243,9 t CO_2 ha $^{-1}$, Tabla 2, Fig. 5).

Marisma alta:

En la marisma alta de Odiel, la densidad bruta del suelo y su edad generalmente aumentan más rápido con la profundidad que en las marismas baja y media, y eran máximas en los testigos de marisma continentalizada con vegetación de *Arthrocnemum macrostachyum* (Tabla 2). En la estación TOR.H (marisma media-alta), situada en el estuario marino-intermedio del río San Pedro (Los Toruños, Bahía de Cádiz), la DB era menor (Tabla 2) y similar a la observada en la marisma media TOR.M y baja TOR.L de la misma localidad (test ANOVA, p< 0,26).

El %C $_{\rm org}$ es menor que en las marismas medias, y similar a la de las marismas bajas (rango de 0,9 ± 1,1(DE)% en ODE.H a 1,5 ± 0,6(DE)% en ODN.D-V, Tabla 2). La densidad de carbono y la reserva de carbono orgánico en el primer metro eran muy variables entre tipos de marisma alta (Tabla 2, Fig. 4 y 5): En Odiel, en la marisma alta del estuario marino-intermedio (ODE.H: 264 ± 142(DE) t CO $_2$ ha $^{-1}$) la reserva de C $_{\rm org}$ era similar a la de la estación OD.H (199 ± 33(DE) t CO $_2$ ha $^{-1}$), en el estuario continentalizado vegetado con *A. macrostachyum*. También era similar a la de la marisma media-alta de los Toruños (TOR.H: 241 ± 116(DE) t CO $_2$ ha $^{-1}$) y de Odiel (OD.MH: 244(DE) t CO $_2$ ha $^{-1}$). Sin embargo, en la marisma alta continentalizada y vegetada con la exótica *S. densiflora*, muy cercana a un

caño, detectamos una alta $Stock_{1m}$ (401 ± 114(DE) t CO₂ ha⁻¹, Tabla 2, Fig. 5), comparable a la detectada en la marisma media. Globalmente, la reserva media de carbono orgánico en el metro superior del suelo de marisma alta (270 ± 77 (DE) t CO₂ ha⁻¹) es similar a la de la marisma baja (Tabla 3, Fig. 5), aunque con un carbono orgánico mucho más antiguo que el de las marismas media y baja, con edades comprendidas entre 980 y 2553 años antes del presente, a 1 metro de profundidad (OD.H y ODN.D-V, respectivamente).

Las tasas de acreción y flujos de carbono en las marismas altas son menores que en las marismas medias y bajas (Tabla 2). El flujo $_{100a}$ 0.57 t CO $_2$ ha⁻¹ año⁻¹ en OD.H y 0.67 t CO $_2$ ha⁻¹ año⁻¹ en ODE.H (Tabla 2), mientras que el flujo $_{\rm lm}$ oscila entre 0.10 t CO $_2$ ha⁻¹ año⁻¹ en ODN.D-V y 0.24 t CO $_2$ ha⁻¹ año⁻¹ en la marisma media-alta TOR.H (Tabla 2). El flujo secular medio de carbono en la marisma alta es de 0.62 ± 0.05(DE) t CO $_2$ ha⁻¹ año⁻¹, y en el primer metro es de 0.17 ± 0.06(DE) t CO $_2$ ha⁻¹ año⁻¹ (Tabla 2), 10 veces menor que en la marisma media, y casi 3 veces menor que en la baja.

Las mayores reservas de carbono orgánico en la biomasa, se encontraban en la marisma alta $(26.5 \pm 14.2 \text{ t CO}_2 \text{ ha}^{-1})$. Esta reserva casi se duplica en las estaciones cuya vegetación dominante es la especie exótica *Spartina densiflora* $(41.0 \pm 5.3 \text{ t CO}_2 \text{ ha}^{-1})$.

Variabilidad en el contenido de carbono orgánico del suelo, ligada a la localidad, a la exposición mareal y a la profundidad del suelo

El análisis de la varianza (ANOVA anidada) entre los dos estuarios (Bahía de Cádiz: todas las estaciones de Los Toruños, en el estuario del río San Pedro; Odiel: las estaciones con mas influencia marina del estuario del Tinto y el Odiel), no mostró varianza significativa entre estuarios en la riqueza o en la densidad de C_{org} (p=0.95 y 0.78, respectivamente) pero sí entre estaciones dentro de cada estuario ($p<10^{-4}$, 52% de la varianza), permitiéndonos utilizar las marismas de la misma tipología en las 2 localidades como réplicas.

Los análisis de la varianza (ANOVA) de la DB, el % $C_{\rm org}$ y la densidad de $C_{\rm org}$ en el primer metro de suelo, entre las diferentes estaciones de marisma de estuario medio: baja no vegetada (ODM.L-C, TOR.L-C, baja vegetada con S. maritima (ODM.L, TOR.L), media (ODE.M y TOR.M y alta (ODE.H, TOR.H), mostró un efecto significativo de la exposición mareal tanto en la densidad bruta (BD) como para el % $C_{\rm org}$ y la densidad de $C_{\rm org}$ (p< 10^{-4} en los tres), mientras que la profundidad del suelo afectaba significativamente a DB (p< 10^{-4}) y % $C_{\rm org}$ (p< 0,01, Tabla 4), aumentando y disminuyendo con la profundidad, respectivamente. Como resultado, la densidad de $C_{\rm org}$ no muestra ningún efecto significativo de la profundidad (p= 0,99, Tabla 4). No se detectó interacción significativa entre la profundidad del suelo y la exposición mareal en ninguna de las 3 variables.

La marisma baja vegetada con *S. marítima* y en la marisma media no se diferenciaban entre sí en la densidad bruta (DB: test *a posteriori* de Tukey, p= 0,47), pero tenían DB significativamente inferiores a la DB en la marisma alta y en la baja no vegetada (p< 0,001 a 0,01, respectivamente), cuyas DB tampoco eran significativamente distintas entre sí (p= 0,13). Tanto el 0 / C_{org} como la densidad de C_{org} del primer metro, eran significativamente mayores en la marisma media que en cualquiera de las otras 3 categorías (test *a posteriori* de Tukey: p< 10⁻⁴ en todos los casos). Además, detectamos una ligera diferencia significativa en el 0 / C_{org} de la marisma alta con la baja vegetada (test *a posteriori* de Tukey: p< 0,05), y marginalmente significativa con la baja no vegetada (test *a posteriori* de Tukey: p= 0,07). La densidad de C_{org} era significativamente menor en la marisma baja vegetada que en la no vegetada (test *a posteriori* de Tukey: p< 0,001), y sólo esta última mostraba una diferencia significativa con la marisma alta (test *a posteriori* de Tukey: p< 0,01).

<u>Tabla 4</u>: *Stocks* y flujos en las distintas tipologías de marismas naturales (áreas no degradadas) de Odiel y bahía de Cádiz (basado en cartografías temáticas de Life Blue Natura) y estima global de reservas y flujos de carbono en las marismas de Andalucía (Vasquez-Loarte, 2017). Se presentan las estimas globales en kilotoneladas de CO₂, a partir de las medias y desviaciones estándar (DE) de cada categoría de marisma natural.

Localidad	Tipo	Area (ha)	Reserva biomasa aérea KtCO ₂	DE	Reserva 1m suelo KtCO ₂	DE	Flujo _{100a} KtCO ₂ año ⁻¹	DE	Flujo _{1m} KtCO ₂ año ⁻¹	DE
	Alta	1046	27,7	7,4	282,1	40,2	0,65	0,03	0,09	0,03
	Media	1029	16,5	4,2	454,6	177,6	2,30	0,48	1,20	0,15
	Baja S. maritima	75	21,9	18,9	368,9	56,9	0,55	0,09	0,63	0,13
Marismas del Odiel	Baja no vegetada	1426	0,0		25,7	5,9	0,08		0,05	
	Baja Z. noltei	36	0,1	0,0	10,0	6,0	0,01			
	Caño submareal	841	0,0		209,6	26,0				
	Total	4453	66,2	7,6	1.351	52	3,59	0,20	0,50	0,10
	Alta	397	10,51	2,82	107,05	15,3	0,24	0,01	0,03	0,01
	Media	853	13,63	3,44	376,61	147,1	1,91	0,40	1,00	0,12
	Baja S. maritima	95	1,47	1,26	24,69	3,8	0,04	0,01	0,04	0,01
Bahía de Cádiz	Baja no vegetada	2084	0		714,0	163,8	2,20		1,40	
	Baja Z. noltei	428	1,3	0,3	85,2	39,3	0,07			
	Caño submareal	877								
	Total	4734	27	2	1.308	74	4,47	0,14	0,62	0,05
Andalucía	Todos	59.351	992	468	19.479	5.567	68,6	36,4	30	22

4. DISCUSIÓN

La mayoría de los testigos obtenidos sólo lograron medir parte del almacén de carbono orgánico encerrado en los suelos de las marismas silvestres ya que no se recuperó el primer metro de registro. Sólo en el caso de la marisma baja vegetada de Odiel (ODM.L), de 259 cm de potencia, alcanzamos sedimento arenoso con conchas ennegrecidas, que podrían corresponder a la barra de arena previa a la formación de la marisma en ese punto. Sin embargo, para estar seguros de ello, habría que incrementar la replicación y profundizar en la cata, y comprobar que no hay más horizontes fangosos debajo. Hasta alcanzar ese horizonte de arena, la densidad de carbono del sedimento no declinaba con la profundidad, sino que aumentaba, al igual que en los lodazales adyacentes sin vegetación. Aunque detectamos una disminución general significativa del porcentaje de carbono orgánico con la profundidad del suelo, la densidad de carbono en el suelo no mostraba un patrón de declive significativo con la profundidad. Esto nos impidió extrapolar nuestras mediciones para obtener una estima de la reserva total de carbono orgánico almacenada en los suelos de la marisma. Sólo en el caso de la marisma alta de El Saltés (ODE.H) observamos un declive de la densidad de carbono con la profundidad. Por extrapolación, estimamos que la densidad de carbono orgánico del suelo en ODE.H caería por debajo de la milésima

de gramo por cm³ entorno a los 2.5 metros y que, en tal caso, la reserva total de carbono orgánico en esta marisma alta podría ser de $294 \pm 157(DE)$ t CO_2 ha¹, un 12% mayor de la reserva acumulada en el primer metro. Por otro lado, la comparación entre la reserva de carbono en el primer metro y a los 259 cm en ODM.L, indica que la reserva total de carbono orgánico en la marisma baja podría ser un 112% mayor que la acumulada en el primer metro.

Comparando el primer metro de suelo, tanto en Cádiz como en Odiel, encontramos que las marismas medias registraban reservas de carbono orgánico significativamente mayores que en las marismas bajas y altas, aunque algunas estaciones de esta tipología, alcanzaban reservas similares a los de marisma media en el primer metro. Las mayores reservas de carbono en la marisma media se deben a unas importantes tasas de acreción y alto contenido en carbono orgánico, de forma que los flujos de carbono, a largo y a corto plazo, eran los más altos. Las marismas bajas y altas registraban flujos y reservas de carbono generalmente similares entre sí.

Otros elementos, como la estabilidad sedimentaria, también jugaban un papel preponderante, pues en la estación de marisma media de La isla de Enmedio, donde hemos detectado una dinámica erosiva, la densidad de carbono orgánico y su reserva en el primer metro eran menores que en las demás estaciones de marisma media sin dinámica erosiva. A escala de paisaje, en Isla de Enmedio la marisma media forma una banda estrecha (1 a 10 metros) de Sarcocornia spp. bordeando la Isla y, a su vez, rodeada de lodazales empinados, con muy poca presencia de S. marítima. En contraste, la marisma media en ODE.M forma una banda mucho más ancha y horizontal, de varios cientos de metros, lo que indica una predominancia de la dinámica deposicional. Las imágenes aéreas muestran que, en esta parte de la isla de Enmedio, la costa retrocedió 12.8 m entre 1956 y 2016. Dicha dinámica erosiva ha sido combatida y documentada por el parque natural Odiel (E. Martínez-Montes, comm pers.). Todas estas observaciones indican que la menor reserva de C_{orr} a 1m detectada en OD.M podría ser consecuencia de un proceso erosivo en las últimas décadas. Sabiendo que las causas de esta erosión son principalmente antropogénicas (aumento de la energía de las olas en las fronteras de los pantanos, debido al tráfico de embarcaciones en el canal; E. Martinez-Montes, comunicación personal), decidimos no incluir esta estación en las estimas globales del stock de carbono de las marismas medias saludables.

También se observaba una diferencia cuantitativa, aunque menos acusada, entre la reserva de carbono orgánico de la marisma baja no vegetada de Los Toruños, donde también detectamos dinámica erosiva, y la de Odiel. Esta dinámica erosiva ha sido detectada en otros puntos del mismo estuario del río San Pedro (Benavente *et al.*, 2006; Gútierrez-Mas y García-López, 2015). La erosión en las marismas, además de impedir el flujo de carbono al sedimento, seguramente está erosionando las reservas de carbono acumuladas durante décadas o siglos y, en última instancia, produciendo emisiones netas de CO₂ a la atmósfera.

Las marismas de marea son espacios con una intensa dinámica geomorfológica: la compleja interrelación entre el río y las corrientes marinas producen áreas con fuerte acumulación de sedimentos (como El Manto, en Odiel), y otras que sufren erosión. Sin embargo, el aumento del nivel del mar y la reducción de aportes sedimentarios por la regulación de los ríos están haciendo que el balance entre acumulación y erosión se incline hacia esta última en muchas marismas, produciendo una pérdida neta de la marisma y de sus reservas de carbono asociadas (Duarte *et al.*, 2013). Un modelo global preliminar sugiere que un aumento del nivel del mar de 50 cm para 2100 resultaría en pérdidas del 46 al 59% de los humedales costeros globales, y la pérdida sería de hasta el 78% bajo un aumento de

110 cm. Sin embargo, estas pérdidas podrían reducirse según sea la gestión costera humana (Spencer *et al.*, 2016).

En Odiel, los flujos de carbono a 100 años y reservas de carbono orgánico en el primer metro en los lodazales no vegetados eran mayores que en los vegetados con S. maritima, lo cual era un resultado inesperado, porque se ha demostrado experimentalmente que S. maritima aumenta la acumulación de sedimentos (Castillo y Figueroa, 2009). Las menores densidades, reservas y flujos de carbono observadas en los sedimentos de ODM.L podrían ser producidos por una mayor mineralización de materia orgánica en los primeros decímetros de sedimento, acelerada por la rizosfera aeróbica de S. maritima, que es mantenida por bombeo de oxígeno a través de las raíces de las plantas (Duarte et al., 2009). Sin embargo, las plantas también producirían un efecto positivo en el almacén de carbono a largo plazo, al estabilizar los sedimentos, como se observa en la menor variabilidad temporal de la tasa de acreción a 100 años, y en la mayor tasa de acreción del primer metro en ODM.L. De hecho, si tenemos en cuenta las reservas de carbono acumuladas mas allá del metro de profundidad, no observamos diferencia entre los lodazales vegetados y las manchas de S. marítima de Odiel. Esto indica que tal vez el efecto somero de la rizosfera se compensa a largo plazo con la estabilización del sedimento y el consecuente incremento en tasa de acreción sedimentaria a largo plazo que produce esta especie (Castillo y Figueroa, 2009).

La erosión observada en los lodazales bajos de Los Toruños, podría deberse a -o haber aumentado desde- la pérdida de las praderas de *Z. noltei* y *S. maritima* en el intermareal, tras la contaminación del agua (Brun *et al.*, 2003; Gútierrez-Mas y García-López, 2015), ya que ambas especies retienen sedimentos (Castillo *et al.*, 1999). Esto indica que los parches restantes de *S. maritima* evitan localmente la pérdida del almacén de carbono del sedimento e incluso lo incrementan, pero que no pueden evitar la pérdida de los bancos de sedimentos adyacentes, probablemente debido a la muy baja extensión actual del *S. maritima*.

Por lo tanto, los resultados en Odiel y la Bahía de Cádiz, indican que los lodazales intermareales pueden tener mayores reservas de carbono en el primer metro, así como mayores flujos seculares que los parches adyacentes de *S. maritima*, pero estas reservas y flujos dependen parcial o totalmente -dependiendo de las condiciones hidrodinámicas locales- de la abundancia de vegetación baja intermareal a su alrededor, que funciona como un felpudo, reteniendo sedimentos, y estabilizando las reservas sedimentarias de carbono orgánico.

El contenido de carbono orgánico del suelo varia significativamente con el régimen de mareas de las marismas (y su vegetación asociada), pero no entre localidades (Odiel vs Cádiz). El porcentaje de carbono orgánico también tiende a decrecer significativamente a lo largo del perfil del suelo, pero la densidad de carbono orgánico no siempre lo hace, debido a que la compactación de las capas inferiores, aumenta la densidad bruta del suelo. Las reservas de carbono acumuladas en el primer metro de suelo también reflejan la variabilidad con el régimen de maras, pero las altas desviaciones estándar indican que también existe una alta variabilidad horizontal intraestación. Además, aunque no se ha podido analizar completamente, la variabilidad horizontal de las reservas de carbono observada a la escala del estuario del Odiel entre varias marismas altas y medias, puede llegar a ser tan importante como la generada por el régimen de marea y probablemente tendría que ver con la antigüedad de la marisma y / o su dinámica de deposición o erosión.

El hecho de que el *stock* de carbono orgánico en la marisma alta sea menor que en la marisma media probablemente se deba a procesos de mineralización de carbono a largo plazo. La marisma media generalmente se transforma en marisma alta a la escala de varios

siglos (Borrego, 1997), por lo que el grueso de las emisiones de gases de efecto invernadero producidas por estos procesos de mineralización tendrían lugar mas lentamente, llevando mucho mas tiempo que 100 años. Por tanto, no invalidan la importancia relativamente grande de la banda del pantano medio para la mitigación del cambio climático, que generalmente tiene en cuenta el carbono que sale de la atmósfera durante al menos 1 siglo.

El hallazgo de grandes reservas de carbono en ciertas partes de la marisma más antigua, hoy continentalizada, sugiere que las mayores reservas de carbono podrían estar relacionadas con la edad y la estabilidad a largo plazo de la marisma a escala de milenios. Como las marismas de marea se asocian con mayor frecuencia al crecimiento de barras de arena en los estuarios, la dinámica temporal a largo plazo de la acumulación de sedimentos en estas áreas es probablemente clave para predecir dónde están las reservas de carbono de sedimento más altas acumuladas, que deben protegerse, para evitar el cambio del ecosistema de marisma costera, de sumidero neto, a emisor neto de gases de efecto invernadero.

5. CONCLUSIONES

Utilizando todas las tipologías de marismas costeras estudiadas en el proyecto, las reservas de carbono orgánico acumuladas en el metro superior de suelos de marismas silvestres en Andalucía oscilaron entre $564 \pm 61(\mathrm{DE})$ t $\mathrm{CO_2}$ ha⁻¹, en la marisma media de Los Toruños (Bahía de Cádiz), a $178 \pm 86(\mathrm{DE})$ t $\mathrm{CO_2}$ ha⁻¹ en la marisma también media, pero bajo dinámica erosiva de la Isla de En medio (Marismas del Odiel).

En general la marisma media es la tipología que atesora mayores reservas de carbono orgánico en su primer metro (442 ± 173(DE) t CO₂ ha⁻¹), y que presenta los mayores flujos de carbono hacia suelo (flujo_{1mCorg}= 1,17 ± 0,14(DE) t CO₂ ha⁻¹ año⁻¹), mientras que las marismas bajas con S. maritima y marismas altas presentan reservas de carbono similares en su primer metro (259 \pm 40(DE) y 270 \pm 77(DE) t CO₂ ha⁻¹, respectivamente), aunque con una gran diferencia en la antigüedad de ese carbono (307 a 757 años en la marisma baja, y 1048 a 2598 años en la marisma alta) y en los flujos de carbono a largo plazo (flujo- $_{\rm lmCorg}$ = 0,45 ± 0,09(DE) y 0,17 ± 0,06(DE) t CO₂ ha⁻¹ año⁻¹ en marisma baja y alta, respectivamente). Además, los lodazales intermareales no vegetados pueden contener mayores reservas de carbono que la marisma baja adyacente vegetada con S. marítima (343 ± 79(DE) t CO₂ ha⁻¹), aunque su estabilidad se ve influenciada por la presencia de esta planta. El stock de carbono promedio en el metro superior de las marismas de Andalucía es de 333 ± 74(DE) t CO₂ ha⁻¹. Como referencia rápida, el stock promedio de carbono de las praderas de P. oceanica en Andalucía es de 1509 ± 1388 (DE) t CO₂ ha⁻¹ (Piñeiro et al., 2019), también para el metro superior, es decir, casi 3 veces mayor que en las marismas, aunque también con mayor variabilidad entre localidades.

En marismas sanas, este *stock* se ha acumulado en el suelo durante el siglo pasado a una tasa promedio de $1.3 \pm 0.9 (\mathrm{DE})$ t $\mathrm{CO_2ha^{-1}}$ año-1. Estas tasas son muy similares a las de las marismas sanas de *Posidonia* en Andalucía, que promediaron 1.8 t $\mathrm{CO_2} \pm 0.4 (\mathrm{DE})$ ha-1 año-1.

Las cartografías temáticas de las distintas tipologías de marisma realizadas en el proyecto Life Blue Natura para las marismas del Odiel (Life Blue Natura 2018b) y de la Bahía de Cádiz (Life Blue Natura 2017) nos permitieron escalar las estimas de reservas y flujos de carbono por unidad de área de cada tipo de marisma (Tabla 3). Las existencias

totales ponderadas en el sedimento del primer metro y los flujos anuales promedio en el último siglo para ambos sitios son de 2,7 \pm 0,1(DE) Mt CO₂ y 8,1 \pm 0,3(DE) kt CO₂ año⁻¹, respectivamente (Tabla 3). El interés de este número es que son las toneladas de CO₂ existentes en las marismas estudiadas, es decir, el valor de referencia sobre el cual evaluar la progresión o la regresión de las tendencias futuras. En otras palabras, estos serían los stocks y flujos que se protegerían en los parques naturales de la Bahía de Cádiz y Odiel. Por otro lado, Vásquez-Loarte (2017) estimó que la extensión actual de marismas costeras en Andalucía es de 59.351 ha. Aplicando las estimas medias de reservas de carbono orgánico medidas en este estudio, obtenemos que las marismas de Andalucía encierran en su primer metro de sedimentos unas 19,5 ± 5,6 Megatoneladas de CO₂ en forma de carbono orgánico (Tabla 3), y habrían enterrado netamente unas 68,6 ± 36,4 Kilotoneladas de CO₂ cada año. Se trata sin embargo de una infra estima de las reservas totales, ya que en todas las estaciones el suelo por debajo de 1 metro de profundidad también contenía carbono orgánico. Basándonos en la diferencia de stocks de carbono orgánico entre el primer metro de sedimento y lo que podría ser el almacén total, que hemos podido observar en la marisma baja (ODM.L) y estimar en la marisma alta (ODE.H) de Odiel, las reservas de carbono totales en las marismas andaluzas serían entre un 112% (en ODM.L) y un 12% (en ODE.H) mayores que en primer metro de sedimento, aunque es concebible que en zonas como la marisma media, el desarrollo vertical del almacén de carbono sedimentario supere los 2,5 metros. Estimamos la reserva de carbono encerrada en la biomasa aérea de las marismas andaluzas en 1.0 ± 0.5 Megatoneladas de CO_2 (Tabla 3), una cantidad 20 veces inferior al carbono orgánico acumulado en el suelo.

Todavía prevalece una gran cantidad de incertidumbres y dificultades, sobre todo ligadas a i) la variabilidad horizontal, el alcance vertical (perfil del suelo), así como los tipos de marismas explorados son limitados, por lo que probablemente la variabilidad natural es mayor, especialmente con respecto a las diferentes tipologías de marismas degradadas y a las marismas costeras mediterráneas sin dinámica mareal, ii) la información espacial sobre el alcance de diferentes tipologías de marismas mareales en otras marismas costeras andaluzas también es limitada, iii) la necesidad de delimitar el posible papel de la precipitación de carbonatos como fuente de CO_2 a la atmósfera, iv) la necesidad de explorar la magnitud y el signo de los flujos de CH_4 y N_2O , dependiendo del régimen de salinidad e insumos orgánicos y de nutrientes en suelos y cuencas hidrográficas, aunque existe información para la Bahía de Cádiz (Burgos *et al.*, 2017) y las marismas de Doñana (Huertas *et al.*, 2019), o v) la complejidad de determinar la pérdida del servicio que suponen diferentes tipos de destrucción del hábitat.

Sin embargo, las diversas tipologías evaluadas aquí constituyen un importante paso adelante, al proporcionar criterios sólidos para el manejo de las marismas y para decidir los mejores entornos para garantizar el éxito de los eventuales proyectos de compensación basados en en evitación de emisiones, tanto por restauración como por conservación de marismas costeras. Estos resultados también proporcionan una línea de base para estimaciones futuras de los cambios en las reservas y flujos de carbono, a través de la diferencia de existencias y/o métodos de ganancia/pérdida, según lo especificado por el IPCC (2006 y 2013).

Las marismas se pueden considerar como el objetivo de carbono azul más atractivo y viable para cualquier proyecto de compensación de conservación o restauración en Andalucía, dada la accesibilidad de los ecosistemas, la rentabilidad de la restauración / reforestación de estos entornos, la abundancia de áreas abandonadas disponibles para la

restauración, y su conexión con políticas de adaptación al cambio climático, debido a su función de protección costera.

ARTÍCULOS

Los proyectos que aumenten de manera sostenible los flujos y las reservas de carbono y otros GEI en los suelos de marisma, por ejemplo mediante una mejor gestión del agua que reduzca el aporte de nutrientes, o mediante la re-humectación, la replantación, o la reducción de la erosión costera, por ejemplo, generarían créditos de carbono en áreas donde hay grandes reservas acumuladas, bajo riesgo de ser mineralizadas, además de mejorar otros servicios ecosistémicos de las marismas, como la protección costera frente a la subida del nivel del mar y los temporales.

6. BIBLIOGRAFÍA:

- Barbier EB, Hacker SD, Kennedy C, Koch EM, Stier AC, Silliman BC., 2011. The value of estuarine and coastal ecosystem services. Ecological Monographs, 81(2): 169–193
- Benavente J, Del Río L, Gracia FJ, Martínez-del-Pozo JA. 2006. Coastal flooding hazard related to storms and coastal evolution in Valdelagrana spit (Cadiz Bay Natural Park, SW Spain). Continental Shelf Research, 26: 1061–1076
- Blaauw M and Christen JA. 2011. Flexible Paleoclimate Age-Depth Models Using an Autoregressive Gamma Process. Bayesian Analysis, 6(3): 457-474 http://ba.stat.cmu.edu/journal/2011/vol06/issue03/christen.pdf
- BORKEN W, MATZNER E. 2009. Reappraisal of drying and wetting effects on C and N mineralization and fluxes in soils. Global Change Biology, 15(4): 808-824, https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01681.x
- Borrego J, 1997/2017. Procesos sedimentarios y secuencias de facies en el estuario mesomareal del río Odiel. In: Geología costera: algunos aspectos metodológicos y ejemplos locales. JG Pendón (Ed.). Universidad de Huelva. EISBN: 978-84-16872-40-4. 240pp. Huelva
- Brun FG, Pérez-Lloréns JL, Hernández I, Vergara JJ. 2003. Area Patch Distribution and Within-Patch Dynamics of the Seagrass Zostera noltii Hornem. in Los Toruños Salt-Marsh, Cádiz Bay, Natural Park, Spain. Botanica Marina, 46: 513–524
- Burgos M, Ortega T, Forja JM. 2017. Temporal and spatial variation of N_2O production from estuarine and marine shallow systems of Cadiz Bay (SW, Spain). Science of the Total Environment, 607–608: 141–151
- Castillo JM, Luque CJ, Figueroa ME. 1999. Cuantificación de la erosión en los canales mareales de las marismas del Odiel (Huelva, SO España). Cuaternario y Geomorfología, 13 (3-4): 7-16
- Castillo JM, Figueroa E. 2009. Restoring Salt Marshes Using Small Cordgrass, *Spartina maritima*. Restoration Ecology, 17(3): 324-326

- Chmura GL, Anisfeld S Anisfel, Cahoon D, Lynch J. 2003. Global carbon sequestration in tidal, saline wetland soils. Biogeochemical Cycles, 17(4): 1-12. DOI: 10.1029/2002GB001917
- Constanza, R. (2008). Letter to the Editor. Ecosystem services: Multiple classification systems are needed. Biological Conservation, 141(1997), 350–352. doi:10.1016/j. seps.2012.01.001
- Díaz-Almela E, Piñeiro-Juncal N, Marco-Méndez C, Giralt S, Mateo MA. 2019. Carbon stocks and fluxes associated to Andalusian saltmarshes and estimates of potential stocks and fluxes changes after diverse land-use changes. Deliverable C2.2 (and C2.1 update): Results Report.
- DUARTE CM, CEBRIAN J. 1996. The fate of marine autotrophic production. Limnology and Oceanography, 41(8): 1758-1766
- DUARTE CM, MIDDELBURG JJ, CARACO N. 2005. Major role of marine vegetation on the oceanic carbon cycle. Biogeosciences, 2: 1–8.
- Duarte CM, Losada IJ, Hendriks IE, Mazarrasa, Marbà N. 2013. The role of coastal plant communities for climate change mitigation and adaptation. Nature Climate Change, 3: 961-968. DOI: 10.1038/NCLIMATE1970
- EMMER IM, VON UNGER M, NEEDLEMAN B, CROOKS S, EMMET-MATTOX S. 2015. Coastal Blue Carbon in Practice: A Manual for Using the VCS Methodology for Tidal Wetland and Seagrass Restoration Restore America's Estuaries. Arlington, 80 pp.
- Gracia FJ, Alonso C, Abarca JM. 2017. Evolución histórica y geomorfología de las explotaciones salineras en marismas mareales. Ejemplos de la bahía de Cádiz. Cuaternario y Geomorfología, 31 (1-2): 45-72
- Gutiérrez-Mas JM, García-López S. 2015. Recent evolution of the river mouth intertidal zone at the Río San Pedro tidal channel (Cádiz Bay, SW Spain): controlling factors of geomorphologic and depositional changes Geologica Acta, 13(2): 123-136
- Huertas IE, de la Paz M, Perez FF, Navarro G, Flecha S. 2019. Methane Emissions From the Salt Marshes of Doñana Wetlands: Spatio-Temporal Variability and Controlling Factors. Frontiers in Ecology and Evolution, 7(32): 15pp. doi: 10.3389/fevo.2019.00032
- IPCC. 2006. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (Eds). Published: IGES, Japan.
- IPCC 2014, 2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands, Hiraishi, T., Krug, T., Tanabe, K., Srivastava, N., Baasansuren, J., Fukuda, M. and Troxler, T.G. (eds). IPCC, Switzerland.
- Jordán-López A. 2005-2006. Manual de Edafología. Universidad de Sevilla, 143 pp. http://ciag-umsa.es/wp-content/uploads/2018/12/suelo-completo_manual-de-edafologia.pdf

- LIFE BLUE NATURA 2017. "Caracterización de la marisma mareal de la Bahía de Cádiz" Proyecto LIFE 14CCM/ES/000957 "Blue Natura Andalucía". Expte. 2016/000225/M. http://life-bluenatura.eu/es/resultados/
- **ARTÍCULOS**
- Life Blue Natura. 2018a. Deliveragle A3 Life Blue Natura: results of the sampling during the field mission in Andalusian coastal saltmarshes). http://life-bluenatura.eu/es/resultados/
- LIFE BLUE NATURA 2018b. Acción A.1.3: Cartografía temática de las marismas del Odiel. Annex A.1.6. http://life-bluenatura.eu/es/resultados/
- Nellemann, C., Corcoran, E., Duarte, C. M., Valdés, L., De Young, C., Fonseca, L., & Grimsditch, G. (2009). Blue carbon The role of healthy oceans in binding carbon
- Spencer T, Schuerch M, Nicholls RJ, Hinkel J, Lincke D, Vafeidis AT, Reef R, McFadden L, Brown S. 2016. Global coastal wetland change under sea-level rise and related stresses: The DIVA Wetland Change Model. Global and Planetary Change, 139: 15-30
- UNFCCC. 2018. Climate Action Now: summary for policy makers. 12 pp. https://unfccc.int/resource/climateaction2020/media/1308/unfccc_spm_2018.pdf
- VASQUEZ LOARTE A. 2017. Seis décadas de regresión de las marismas andaluzas: análisis de las causas e implicaciones para el secuestro de carbon. Máster en Ecología, Gestión y Restauración del Medio Natural, Facultad de Biología de la Universidad de Barcelona. 43pp.