FORMAS DE CARBONO Y ACTIVIDAD MICROBIANA EN SUELOS DE MANGLAR DE VENEZUELA

Adriana Méndez [*(1)], Xose Luis Otero [(1)], Felipe Macías [(1)], Williams Meléndez [(2)]

[1] Departamento de Edafología y Química Agrícola, Facultad de Biología, Universidad de Santiago de Compostela (USC) 15782, Santiago de Compostela (España), adriana.mendez.moreno@rai.usc.es, felipe.macias.vazquez@usc.es, xl.otero@usc.es. [2] Centro de Geoquímica, Instituto de Ciencias de la Tierra (ICT), Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela (UCV), Caracas 1010 A (Venezuela), william.melendez@ciens.ucv.ve

RESUMEN

Un estudio biogeoquímico y de los procesos edáficos se llevó a cabo en manglares de diferentes ambientes (Golfete de Cuare, Laguna La Restinga y Laguna Las Marites, Venezuela), tipo de vegetación *(Lagungularia, Rhizophora, Avicennia)* y profundidad (0-135 cm). A partir de 46 muestras de suelo, secas al aire y tamizadas a 2mm, se realizo un fraccionamiento de carbono (C) y análisis de St, Nt, pH, CO_3^{2-} y Ct. En el fraccionamiento de C se hicieron determinaciones de C no oxidable, C oxidable con $K_2Cr_2O_7$ a temperatura ambiente (sin fuente externa de calor) y en caliente (110ºC), extraíble con $Na_4P_2O_7$ (Cp), soluble en agua y metabolizable. Se puso de manifiesto la existencia de contenidos elevados de C total (<35%), el predominio de las formas fácilmente oxidables (con $K_2Cr_2O_7$ a T amb.) y una mayor actividad microbiana en los horizontes superficiales que en los profundos.

Palabras claves: fraccionamiento, metabolizable, oxidable.

INTRODUCCION

Los manglares constituyen un importante recurso forestal en toda la banda intertropical del planeta. A nivel global se estima una extensión de 15 millones de ha distribuidas en $6{,}9x10^6$ ha en la región Indo-Pacifico, $4{,}1x10^6$ ha en Sur y Centroamérica y $3{,}5x10^6$ ha en África. Su problemática principal es degradación progresiva de estos sistemas en los últimos años (Yañez y col., 1998). Se trata de sistemas con elevados contenidos de C (15-35%) muy vulnerables a cambios en su dinámica natural. Los sistemas de manglar pueden retener elevadas cantidades de C, sin embargo, si son sometidos a alteraciones bruscas en sus condiciones biogeoquímicas, podrían pasar de *sumideros* a *fuentes* en breves periodos de tiempo y convertirse así en peligros potenciales para el forzamiento climático. Parece acertado por tanto, centrar el interés en el tiempo en el que el C permanece en estos ecosistemas, de gran importancia biológica debido a su elevada productividad vegetal y a los innumerables beneficios climáticos y socio-económicos que provee. Pese a ello, los manglares del territorio venezolano han sido poco estudiados respecto a la dinámica del C (Sánchez et al., 2010; Rivera et al., 2004), razón por la cual este trabajo está enfocado en obtener una caracterización general de estos sistemas y en función de los resultados obtenidos, determinar su posible consideración como sumideros de C. Se estudian, a partir del análisis en la fracción menor a 2mm, tres bosques ubicados en las lagunas de La Restinga y Las Marites (Isla de Margarita, Estado Nueva Esparta) y el Golfete de Cuare (Estado Falcón), con el objetivo de conocer la dinámica y el comportamiento edáfico y biogeoquímico del C presente y las

formas de C a nivel superficial y en profundidad en 3 diferentes ecosistemas de manglar del territorio venezolano.

MATERIALES Y METODOS

Fueron colectadas en campo (Enero 2009) un total de 46 muestras de suelos de diferente profundidad, definidas como superficiales (0-20 cm), intermedias (20-60 cm) y profundas (80-135cm). Corresponden a suelos desarrollados (Ferreira et al., 2006) bajo un sustrato de diferente vegetación el cual incluye zonas de manglar degradadas, de vegetación baja y propia del manglar constituida por las siguientes especies: *Rhizophora mangle, Avicennia germinans* y *Lagungularia racemosa.* Los 3 sistemas estudiados fueron: Laguna de La Restinga, Laguna de las Marites y Golfete de Cuare. En condiciones de campo se obtuvieron datos de Eh, pH y CE. Para los análisis de laboratorio, la totalidad de muestras de suelos de manglar fue previamente secada al aire (~25ºC) y tamizada a 2 mm. Posteriormente, se llevó a cabo la determinación en húmedo de las medidas de pH en H_2O manteniendo una relación suelo: agua de 1:2,5. En cuando a los procedimientos en seco, se obtuvieron los contenidos de S, C y N totales tras la combustión a ~ 1000ºC y en presencia de O_2, en analizadores específicos. Los equipos utilizados fueron los siguientes: LECO-Truspec CHN (Nt, Ct) y SC-144DR (St). El C inorgánico fue determinado por medio del *Calcímetro de Bernard.* Los métodos oxidativos (Macías et al., 2004) consistieron en la aplicación de la técnica de oxidación modificada por Walkley y Black con ciertas variaciones en el que la materia orgánica (MO) se oxida con $K_2Cr_2O_7$ en presencia de H_2SO_4 y se valora (utilizando difenilamina como indicador redox) con una sustancia reducida (FAS: Sulfato Ferroso Amónico, Sal de Mohr). El método se llevó a cabo tanto a temperatura ambiente como a 110 ºC. Para la fracción humificada del C se procedió a la extracción con $Na_4P_2O_7$ (Bascomb, 1968) y su posterior determinación por medio de la oxidación con dicromato potásico en medio acido, mientras para extraer el C soluble en agua se efectuó un procedimiento simple con H_2O a 20 ºC (temperatura ambiente) y una segunda extracción a una temperatura mayor de 80º (Ghani, 2003). La determinación del C soluble se llevo a cabo en un colorímetro modelo FLOWSYS Third Generation Continuos Flow Analizer (a una longitud de onda de 550 nm). Finalmente, se realizaron las determinaciones de C metabolizable en un respirómetro automatizado Micro – Oxymax de la casa comercial Columbus Instruments, realizando mediciones de las emisiones de gas CO_2 cada 6 horas, durante 3 días de incubación en condiciones definidas como óxicas (muestras con la humedad natural) y subóxicas (muestras sobresaturadas de agua, cubiertas con una columna de agua) en condiciones de salinidad y pH equivalentes a los valores medidos en campo. Antes de proceder a la respirometría, la totalidad de muestras se mantuvo durante 7 días saturada con agua salada.

RESULTADOS Y DISCUSION

Los valores de Eh, indican un predominio de las condiciones subóxicas aun en superficie con presencia de algunos horizontes profundos, de carácter anóxico fuertemente reductor (Eh<100 mV) que favorece la formación de sulfuros metálicos (Brookins, 1988). Los contenidos superiores de S total mayores, en general en las muestras más profundas, parecen confirmar esta hipótesis. Contrastando los datos de pH

con la concentración de este elemento, se observa una estrecha dependencia en la que los valores más bajos de pH coinciden con los contenidos de S más elevados lo que sugiere una cierta acidificación del suelo (Tabla 1).

Tabla 1: Parámetros fisicoquímicos (lagunas La Restinga: PnºLR y Las Marites: PnºLM, Golfete de Cuare: PnºGCU). Las letras A y B indican suelo bajo distinta vegetación en el mismo transecto de muestreo (los resultados son reportados con la desviación estándar de las replicas, nd corresponde a valores no detectados)

Muestra	Profundidad	Eh ± 0,01	Condiciones redox	pH ± 0,1 (camp.,)	pH H20 ± 0,01 (lab.,)	[St] ± 0,05	[Ct] ± 0,6	[Nt] ± 0,04	C/N
vegetacion	(cm)	(mV)	(Otero y col., 2006)	(u pH)	(u pH)	(%)	(%)	(%)	
	0-5	174	suboóxicas	6,1	5,87	2,36	23,7	1,47	16
P2LR (A)	5-10	74	anóxicas	6,2	6,23	1,56	18,3	0,98	19
Avicennia	100-110	34	anóxicas	6,0	6,17	2,37	19,1	1,13	17
	0-5	374	óxicas	5,3	5,78	1,58	26,2	1,29	20
P2LR (B)	50-60	66	anóxicas	6,3	5,01	4,30	21,2	0,93	23
Avicennia	100-110	44	anóxicas	6,6	4,93	4,44	21,5	0,87	25
	0-5	244	suboóxicas	6,8	6,78	1,71	26,5	1,54	17
P5LR (A)	65-75	243	suboóxicas	6,9	5,53	3,11	21,2	1,14	19
Avicennia	95-105	-6	anóxicas	6,2	4,90	3,24	21,1	0,84	25
	0-5	199	suboóxicas	6,1	5,27	1,86	16,4	0,91	18
P8LR (A)	10-15	124	suboóxicas	6,8	5,84	1,04	3,5	0,29	12
Avicennia	110-120	-86	anóxicas	6,9	7,45	1,42	5,9	0,40	15
	0-5	244	suboxicas	6,6	6,41	2,30	27,3	1,32	21
P1LM	40-50	79	anoxicas	6,8	5,09	3,64	20,1	0,75	27
Rhizophora	100-110	19	anoxicas	6,4	8,04	3,18	15,1	0,55	28
P2LM	0-5	304	suboxicas	6,0	6,33	1,80	21,3	1,11	19
Avicennia	10-15	214	suboxicas	6,7	4,21	3,10	18,3	0,94	19
Rhizophora	55-65	94	anoxicas	7,2	3,45	4,23	19,7	0,79	25
	0-5	19	anoxicas	7,5	8,15	0,49	3,7	0,19	20
P5LM	10-15	29	anoxicas	7,6	8,06	0,70	4,2	0,20	21
Avicennia	100-110	-16	anoxicas	7,8	7,79	1,37	9,8	0,42	23
	0-5	nd	nd	nd	7,20	< 0,1	0,7	0,12	6
P1CU	10-15	nd	nd	nd	6,40	0,2	< 0,6	0,11	6
sedimento	20-25	nd	nd	nd	6,60	0,2	< 0,6	0,10	6
(Lagungularia)	0-20	nd	nd	nd	5,70	0,2	4,3	0,27	16
	0-5	444	oxicas	5,5	5,60	< 0,1	2,2	0,19	11
P2CU	20-25	574	oxicas	4,7	5,10	< 0,1	1,3	0,16	8
vegetacion baja	40-45	nd	nd	nd	5,10	< 0,1	0,7	0,15	5
	5-10	94	anoxicas	7,0	6,70	1,5	15,2	0,88	17
P2GCU	10-15	74	anoxicas	7,0	6,40	1,7	14,2	0,69	21
Avicennia	125-130	-66	anoxicas	7,3	3,30	4,3	14,9	0,55	27
	0-5	-16	anoxicas	7,2	7,20	< 0,1	5,9	0,33	18
P4GCU	30-35	204	suboxicas	6,4	4,60	1,1	2,2	0,12	18
manglar degradado	115-120	84	anoxicas	6,4	2,90	2,5	1,1	0,11	9
	0-5	44	anoxicas	5,6	6,20	2	21,3	1,10	19
P8GCU	65-70	244	suboxicas	5,8	4,70	4,4	16,1	0,60	27
Avicennia	120-125	-11	anoxicas	6,1	4,00	5,1	17,7	0,61	29
	0-5	31	anoxicas	6,9	5,50	2,1	28,7	1,04	28
P9GCU	10-15	-6	anoxicas	6,1	4,50	3,7	19,2	0,86	22
Rhizophora	65-70	14	anoxicas	6,2	4,80	6,4	19,0	0,73	26
P10GCU	0-5	194	anoxicas	5,7	6,20	0,6	8,3	0,54	15
Avicennia	60-65	266	suboxicas	6,0	4,00	0,7	1,0	0,08	13
manglar degradado	85-90	264	suboxicas	6,0	3,80	0,7	0,6	0,06	11
	0-5	303	suboxicas	5,3	6,10	1,6	25,5	1,45	18
P14GCU	85-90	174	suboxicas	6,1	6,00	3,6	34,5	1,17	30
Rhizophora	110-115	47	anoxicas	6,0	5,90	3,2	31,6	1,03	31

La elevada relación C/N (rango mayoritario: 15-30) indica una limitación de la humificación, probablemente ligada a una cierta deficiencia de N que se incrementa en los horizontes más profundos, los cuales por ser los más reducidos pueden favorecer la existencia de procesos de desnitrificacion. El C presente en estos ecosistemas es fundamentalmente de tipo orgánico, encontrándose contenidos muy bajos de C inorgánico (<0,8%).

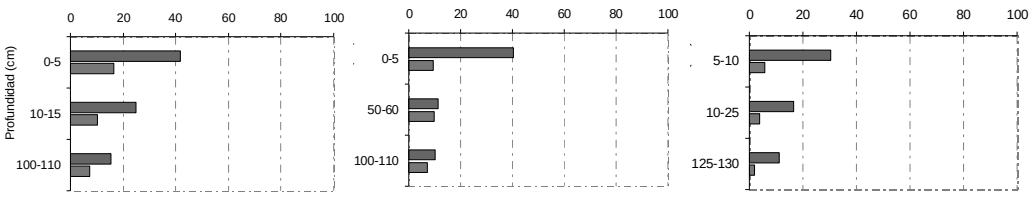

Fig.1: Respiración de suelo en mg C-CO_2/kg CO.h (izquierda a derecha: P5LM, P2LR (B) y P2GCU), condiciones óxicas, barra superior / subóxicas, barra inferior)

Dentro del fraccionamiento de C (Macías, 2004) la contribución predominante está definida por la fracción de C fácilmente oxidable, es decir, oxidable con $K_2Cr_2O_7$ a T amb. (Fig.3). Formas difícilmente oxidables y no oxidables o "black carbon" aparecen en pequeñas proporciones, por lo que una modificación de las condiciones tanto hacia la anaerobiosis como hacia la oxidación supondría una elevada mineralización de la materia orgánica lábil. Las concentraciones obtenidas al calentar a 110ºC fueron mayores en la totalidad de muestras que aquellas a las que no se le aplico ninguna fuente externa de calor diferente al carácter exotérmico propio de la reacción química, lo que evidencia que la modificación de la cinética al acelerar la reacción aumentando la temperatura, garantiza una oxidación más eficiente del C presente. Esto explica gran parte de la labilidad del C almacenado cuando se modifican las condiciones redox por cambios en el nivel freático, velocidad de circulación de agua o aporte de necromasa, entre otros factores, lo que pone de manifiesto la enorme atención que merecen estos ecosistemas en función de la necesidad de conservarlos en su estado natural. Los contenidos y formas de C no presentan un patrón definido en cuanto al tipo de vegetación, por lo que se infiere que su distribución y tendencia, depende principalmente de otros factores de tipo climáticos y estructurales como los son el estado de desarrollo de los bosques y los cambios estacionales. Sin embargo zonas degradadas, carentes de vegetación y con especies diferentes a las típicas de manglar (vegetación baja), difieren de estas en cuanto a la estabilidad relativa del C presente, así como también en cuanto a los aportes de necromasa (Fig.3), marcando notables diferencias entre suelo y sedimento (Ferreira et al., 2006).

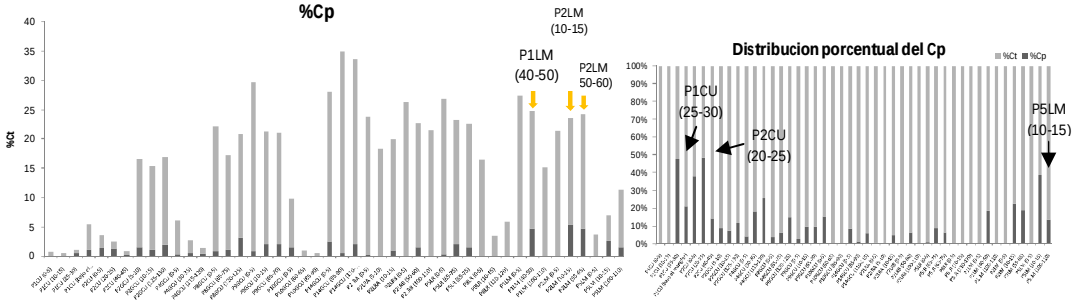

Fig. 2: Distribución de C extraído en pirofosfato sódico respecto al Ct

La velocidad de descomposición de la materia orgánica del suelo (MOS) por la biota presente en los suelos de manglar estudiados, es en líneas generales considerablemente mayor a niveles superficiales y bajo condiciones óxicas en las que el O_2 libre es el principal agente oxidante, responsable de la mineralización de la MOS (Fig. 1). Así mismo se ha observado una mayor liberación de CO_2 por metabolismo en los suelos que reciben mayores contribuciones de excrementos de aves. Es decir, en suelos que deben ser definidos como ornícticos en el segundo nivel de definición de las unidades de la WRB (2006).

Los contenidos de C extraído en $Na_2P_2O_7$ (Cp) son indicativos de la fracción humificada de la MOS. El Cp, representa en líneas generales una fracción muy baja de C. Las cantidades más elevadas se presentan en las muestras P1LM (40-50), P2LM (10-15) y P2LM (50-60), con valores que oscilan entre 4,5 y 5,5% (Fig. 2). Los mínimos se

ubican por debajo del 0,1%. Los suelos con mayor contenido en C humificado, están asociados a contenidos elevados de Ct, cercanos al 25%. Al menos una cuarta parte del C presente en algunos horizontes superficiales y subsuperficiales, presenta una relativa recalcitrancia debida a los procesos de humificación de la MO, lo cual se confirma con la sumatoria de las formas de C más recalcitrantes correspondientes al C no oxidable y C difícilmente oxidable con valores que se ubican dentro de un rango que varia entre un 36% (P14GCU (0-5)) hasta un 72% (P2GCU (10-15)) del Ct. Aquellos horizontes en los que la fracción humificada representa casi el 50% del total de C presente son: P1CU (25-30), P2CU (20-25) y P5LM (10-15). Los resultados denotan la importancia de la calidad del C y no solo de su cantidad. La humificación es uno de los mecanismos que favorece el secuestro de C en los suelos. Aquellos suelos con muy elevados contenido de Ct (~35%) como es el caso de P14GCU (85-90), (bosque de *Rhizophora*) pueden contener una MO poco evolucionada, con muy bajas cantidades de CO de tipo húmico respecto al Ct. Sin embargo, suelos como P5LM (10-15) (bosque de *Avicennia*) con cantidades de Ct del orden del 8% son capaces de retener alrededor de un 40% de formas estables de MO (Figs.2 y 3). En relación a la profundidad, de acuerdo a los contenidos de C humificado y a las formas más recalcitrantes de C (C on ox. y C dif. ox.) no parece existir una tendencia clara hacia una mayor humificación hacia los niveles más profundos (Fig.2).

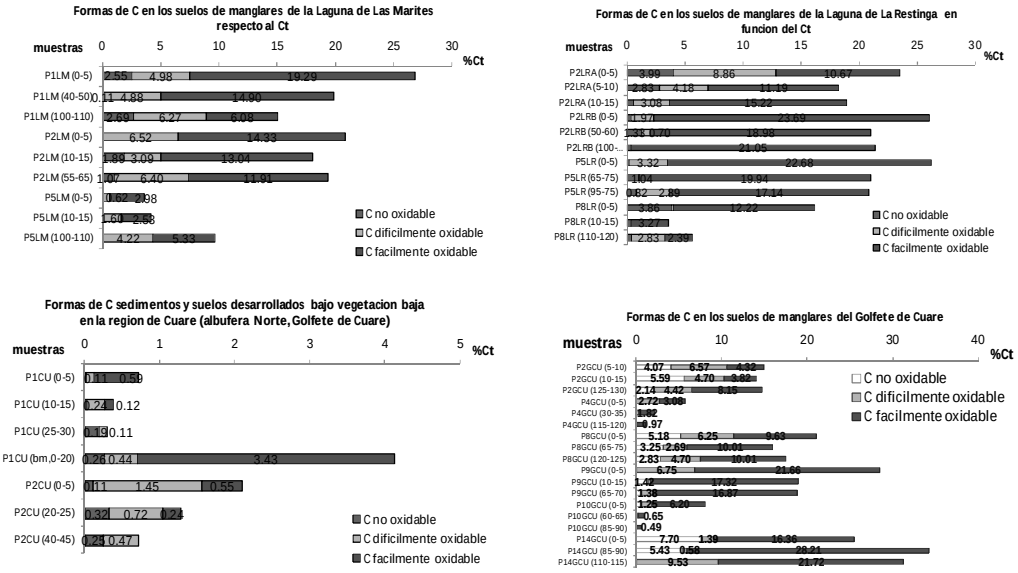

Fig. 3: Distribución de las formas de C presentes en relación a los contenidos de Ct (secuencia de oxidabilidad: C no ox.: C total - C ox. con $K_2Cr_2O_7$ a 110ºC, C dif. ox.: C ox. con $K_2Cr_2O_7$ a 110ºC - C ox. con $K_2Cr_2O_7$ a T amb., C fac. ox.: C ox. $K_2Cr_2O_7$ a T amb. - C sol. en H_2O (C extr. a 20ºC + C extr. a 80ºC)

CONCLUSIONES

Las condiciones dominantes en los suelos de los manglares en estudio son las subóxicas, propias de suelos hidromorfos no excesivamente reducidos, y sólo en algunos horizontes subsuperficiales se encuentran condiciones asociadas a los suelos tiónicos o sulfídicos. El contenido de C varía ampliamente, dependiendo de los aportes

de necromasa y de las condiciones del sistema. Se encuentran valores superiores al 30% de C, y la mayor parte son superiores al 20%, lo que pone de manifiesto la extraordinaria importancia de estos sistemas como sumideros de C y la necesidad de conservarlos en su estado natural. Las formas de C dominantes son las fácilmente oxidables con dicromato potásico a T ambiente. Las formas difícilmente oxidables y las no oxidables o "black carbon" aparecen en pequeñas proporciones. Reducciones en el aporte de necromasa por degradación salina o fases iniciales de la colonización así como un incremento de las condiciones de oxidación, reducirían drásticamente el papel de sumideros de C de estos sistemas.

BIBLIOGRAFIA

Bascomb, C.L., 1968. Distribution of pyrophosphate extractable iron and organic carbon in soils of various groups. Journal of Soil Science, 19: 251-256.

Brookins, D.G., 1988. Eh-pH diagrams for Geochemistry. Springer-Verlag. New York.

Ferreira, T.O.; Otero, X.L.; Vidal, P and Macías, F., 2007. Are mangrove forest substrates sediments or soils? A case study in southeastern Brazil?. Catena, 70: 79-91.

Ghani, A.D; Dexter, M. and Perrott, K.W., 2003. Hot-water extractable carbon in soils: a sensitive measurement for determining impacts of fertilization, grazing and cultivation. Soil. Biol. Biochem. 35: 1231-1243.

Otero, X. L.; Ferreira, T.O.; Vidal-Torrado, P. y Macías, F., 2006. Spacial variation in pore water geochemistry in a mangrove system (Pai Matos Island, Caneneira-Brazil). *Applied Geochemistry*. V.21,pp 2171-2186.

Macías, F.; Calvo de Anta, R.; Rodriguez, L.; Verde, R.; Pena, X.; Camps, M., 2004. El sumidero de Carbono de los suelos de Galicia. Edafologia, 11-3, 342-376.

Rivera-Monroy, V:H.; Twilley, R.R.; Medina, E.; Moser, E.B.; Botero, L.; Francisco, A.M. and Bullard, E., 2004. Spatial variability of soil nutrients in disturbed riverine mangrove forests at different stages of regeneration in the san Juan river estuary, Venezuela. Estuaries 27: 44-57.

Sanchez-Arias, L.; Paolini, J. and Rodriguez, J.P., 2010. Dinámica de las propiedades del suelo en bosques de *Rhizophora mangle* L. (*Rhizophoraceae*) en Isla de margarita, Venezuela. Revista de Biología Tropical 58: 547-564.

Yanez, A.; Twilley, R.R y Lara, A.L., 1998. Los ecosistemas de manglar frente al cambio climático. Madera y Bosques, 4 (2): 3-19.

Vidal, P.; Ferreira, T.O.; Otero, X.L.; Souza, V.S.; Ferreira, F.P.; Andrade, G.R. y Macías, F., 2010. Pedogenetic processes in mangrove soils. In: Biogeochemistry and Pedogenetic Process in Saltmarsh and Mangrove Systems, Otero, X.L and Macias, F., 25-50, Nova Science Publishers, Inc. USA.

Walkley, A. y Black, I, 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic titration method. Soil Sci, 37: 29-38.