

# SIMULACIÓN DE LOS CAMBIOS DE CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO EN ESPECIES TROPICALES ARBÓREAS CON EL MODELO ROTH C 26.3

Lucila González Molina, Miguel Acosta Mireles, Fernando Carrillo Anzures y Agustín Rueda Sánchez

## RESUMEN

El presente estudio se realizó en el municipio de la Huerta, Jalisco en plantaciones de 15 años de edad de cuatro especies tropicales arbóreas: rosa morada (*Tabebuia rosea* (Bertol) DC), teca (*Tectona grandis* L.), melina (*Gmelina arborea* Roxb.) y parota (*Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb.). El objetivo fue estimar los cambios de carbono orgánico del suelo (COS) después del cambio de uso de suelo (CUS) de agrícola a plantación forestal: i) con manejo de hierbas y arbustos y ii) sin manejo de estas. El C aportado al suelo por los residuos vegetales (RV) de los árboles y el COS en las profundidades de suelo 0-15 y 15-30cm fueron medidas después del CUS. Los cambios del COS se

simularon con el modelo de la dinámica del carbonono RothC 26.3. Las plantaciones sin manejo aportaron más RV en comparación al sistema con manejo, entre 6,3 y 9,3 y entre 3,7 y 6,6Mg C ha<sup>-1</sup>/año, respectivamente. Parota y rosa morada sin manejo tuvieron mayor aporte de RV y COS: 70 y 64Mg C ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Los cambios de COS se simularon con un valor de eficiencia del modelo de 90% y R<sup>2</sup> de 0,90. La tasa de cambio del COS (Mg ha<sup>-1</sup>/año) después de 40 años de simulación de CUS con plantaciones de especies forestales tropicales sin manejo fue mayor y positiva, entre 0,1 y 0,7, mientras que en las plantaciones con manejo fue de -0,2 a 0,3.

## Introducción

Los suelos en condiciones tropicales representan el 30% del almacén global del carbono (C) con 384-506Pg a 1m de profundidad (Batjes, 1996, Eswaran *et al.*, 1993) y su cobertura aérea almacena 206Pg de C (Eswaran *et al.*, 1993). No obstante, se estima que anualmente se pierden en estos suelos millones de hectáreas de bosques por deforestación, principalmente en Latinoamérica, con promedio de pérdidas de 0,9Pg C (IPCC, 2013).

En el caso de México los bosques tropicales pueden ser caducifolios (64% de la superficie) y perennes en un 36%, y son los más perturbados por las actividades humanas ya que anualmente cambian a uso agrícola, pastos y otros usos a una tasa de 1,4 a 1,9%

(Trejo y Dirzo, 2000). A pesar de su importancia, la información sobre el contenido de C en sus almacenes y por especie arbórea es escasa. En general, los cambios del carbono orgánico del suelo (COS) se evalúan en periodos mayores a 20 años a partir de mediciones en experimentos de larga duración y con el uso de modelos de la dinámica del carbono (IPCC, 1997). Entre los modelos de la dinámica del C más usados se encuentra el RothC (Viaud *et al.*, 2010), que ha sido aplicado en ecosistemas agrícolas, forestales y pastizales (Coleman *et al.*, 1997; Falloon *et al.*, 1998); sin embargo, bajo condiciones tropicales, se dispone de escasa información para validar su desempeño (Cerri *et al.*, 2007). En México, González *et al.* (2011, 2016) evaluaron su desempeño

del RothC en diferentes sitios y sistemas agrícolas y forestales, obteniendo en estos últimos una eficiencia del modelo de 90% y r= 0,96.

El presente estudio se llevó a cabo en plantaciones de 15 años de edad de cuatro especies tropicales arbóreas: rosa morada (*Tabebuia rosea* (Bertol) DC), teca (*Tectona grandis* L.), melina (*Gmelina arborea* Roxb.) y parota (*Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb.). Los objetivos fueron: 1) estimar la cantidad de carbono (C) aportado al suelo por plantación forestal con manejo de hierbas y arbustos (a) y sin manejo de éstas (b); 2) evaluar el desempeño del RothC en la simulación de los cambios del COS; y 3) estimar la tendencia de los cambios de COS con el uso del RothC en las especies forestales después del cambio

de uso de suelo de agrícola a forestal.

## Materiales y Métodos

### Características del sitio de estudio

El sitio de estudio se ubica en el Campo Experimental 'Costa de Jalisco' del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), entre los municipios de la Huerta y Casimiro Castillo, Jalisco, México, en 19°31'1''N y 104°32'00''O, a una altitud de 298msnm. El clima es Aw1(w) cálido subhúmedo con lluvias en verano, según la clasificación Köppen modificada por García (1988). La temperatura media anual es de 23°C y la precipitación media anual es de 1, 285mm (CNA, 2014). La vegetación predominante corres-

## PALABRAS CLAVE / Almacenes de Carbono / Cambio Climático / Cambio de Uso del Suelo / Plantaciones /

Recibido: 07/02/2017. Modificado: 28/03/2018. Aceptado: 02/04/2018.

**Lucila González Molina.** Doctora en Ciencias en Edafología, Colegio de Postgraduados, México. Investigadora, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), México.

Dirección: Campo Experimental Valle de México, INIFAP. Carretera Los Reyes-Textoco, Km. 13.5, Coatlinchán, Estado de México. C.P. 56250. México. e-mail: gonzalez.lucila@inifap.gob.mx

**Miguel Acosta Mireles.** Doctor en Ciencias en Edafología, Colegio de Postgraduados, México. Investigador, INIFAP, México.

**Fernando Carrillo Anzures.** Doctor en Silvicultura, University of Wisconsin-Madison,

EEUU. Investigador, INIFAP, México.

**Agustín Rueda Sánchez.** Doctor en Ciencias Agrícolas y Forestales, Universidad de Guadalajara, México. Investigador, INIFAP, México.

## SIMULATION OF CHANGES IN SOIL ORGANIC CARBON IN TROPICAL TREE SPECIES USING THE ROTHC 26.3 MODEL

Lucila González Molina, Miguel Acosta Mireles, Fernando Carrillo Anzures and Agustín Rueda Sánchez

### SUMMARY

This study was conducted in the municipality of La Huerta, Jalisco, Mexico, in 15-year-old plantations of four tropical tree species: rosa morada (*Tabebuia rosea* (Bertol) DC), teca (*Tectona grandis* L.), melina (*Gmelina arborea* Roxb.) and parota (*Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb.). The objective was to estimate changes in soil organic carbon (SOC) after land use change (LUC) from agriculture to forest plantation: with (i) and without (ii) herbs and shrub control. Carbon contributed to the soil by plant residues (PR) from trees and the SOC in soil depths of 0-15 and 15-30cm were measured after LUC. SOC changes were simulated with the RothC 26.3 model of

carbon dynamics. Plantations without herbs and shrub control, compared with those with control, had a greater PR contribution (9.3 to 6.3Mg C ha<sup>-1</sup>/year and 3.7 to 6.6Mg C ha<sup>-1</sup>/year, respectively). Parota and rosa morada with no herbs control had higher contributions from PR and SOC (70 and 64Mg C ha<sup>-1</sup>). SOC changes were simulated with a model efficiency value of 90% and an R<sup>2</sup> of 0.90. The simulated rate of SOC change (Mg ha<sup>-1</sup>/year) 40 years after LUC to plantations with tropical forest species without herbs and shrub control was higher and positive, between 0.1 and 0.7, while in the plantations with control, it was -0.2 to 0.3.

## SIMULAÇÃO DAS MUDANÇAS DE CARBONO ORGÂNICO DO SOLO EM ESPÉCIES TROPICAIS ARBÓREAS COM O MODELO ROTHC 26.3

Lucila González Molina, Miguel Acosta Mireles, Fernando Carrillo Anzures e Agustín Rueda Sánchez

### RESUMO

O presente estudo foi realizado no município "La Huerta", Jalisco em plantações de 15 anos de idade de quatro espécies tropicais arbóreas: Ipê rosa (*Tabebuia rosea* (Bertol) DC), teca (*Tectona grandis* L.), melina (*Gmelina arborea* Roxb.) e guanacaste (*Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb.). O objetivo foi estimar as mudanças de carbono orgânico do solo (COS) depois da mudança de uso de solo (MUS) de agrícola a plantação florestal: i) com manejo de ervas e arbustos e ii) sem manejo de estas. O C aportado ao solo pelos resíduos vegetais (RV) das árvores e o COS nas profundidades de solo 0-15 e 15-30cm foram medidas depois da MUS. As mudanças

do COS foram simulada com o modelo da dinâmica do carbono RothC 26.3. As plantações sem manejo aportaram mais RV em comparação ao sistema com manejo, entre 6,3 e 9,3 e entre 3,7 e 6,6Mg C ha<sup>-1</sup>/ano, respectivamente. Guanacaste e Ipê rosa sem manejo apresentaram maior aporte de RV e COS: 70 e 64Mg C ha<sup>-1</sup>, respectivamente. As mudanças de COS se simularam com um valor de eficiência do modelo de 90% e R<sup>2</sup> de 0,90. O índice de mudança do COS (Mg ha<sup>-1</sup>/ano) após de 40 anos de simulação de MUS com plantações de espécies florestais tropicais sem manejo foi maior e positiva, entre 0,1 e 0,7, enquanto que nas plantações com manejo foi de -0,2 a 0,3.

ponde al bosque tropical subdeciduo (Rzedowski y McVaugh, 1966). El suelo es Feozem háplico, con valores promedio de pH, materia orgánica, N-NO<sub>3</sub> y P-Brayn de 6,5; 2,3%; 14,0 y 60mg·kg<sup>-1</sup>, respectivamente.

### Especies estudiadas

Las especies tropicales arbóreas en estudio fueron cuatro de las seis más comunes en este tipo de vegetación debido a su mayor supervivencia: rosa morada (*Tabebuia rosea* (Bertol) DC), teca (*Tectona grandis* L.), melina (*Gmelina arborea* Roxb.) y parota (*Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb.). Dichas especies se establecieron en plantaciones en marco real en el año de 1994, los

árboles se plantaron en una separación de 4×4m.

### Aporte de carbono orgánico de residuos aéreos y subterráneos

Las especies forestales fueron evaluadas en parcelas con manejo y sin manejo de hierbas y arbustos en el año de 2009, a 15 años de su establecimiento. En el primer tratamiento se establecieron tres especies: rosa morada, teca y melina, con control de herbáceas y arbustos en forma mecánica y mediante rastreos. En el segundo tratamiento se evaluaron rosa morada y parota sin control de hierbas y arbustos. En el sistema forestal sin manejo, el carbono aportado

por los residuos vegetales (RV) fue medido en la biomasa de arbustos, hierbas, hojarasca y raíces y en el caso del sistema forestal con manejo fue medido solamente en raíces. Para el muestreo de la biomasa se usó la metodología de Márquez (1997), que consistió en delimitar seis sitios de muestreo en forma aleatoria por parcela experimental. La dimensión de estos sitios fue de 1m de largo por 1m de ancho y se consideró que tuviera condiciones homogéneas y la presencia de cuatro árboles de la misma especie.

El material vegetal de arbustos y hierbas que quedó dentro del cuadro de 1×1m (1m<sup>2</sup>) se cortó a nivel de suelo, mientras que la hojarasca se colectó en

el área de un cuadro de 0,50×50cm (0,25m<sup>2</sup>). Las raíces fueron removidas de las muestras de suelo en forma manual al pasar la muestra en tamices de diferente apertura. Estos residuos vegetales se secaron en una estufa a 75°C durante 48h y se pesaron. Para obtener el aporte de carbono, los datos de peso seco de la biomasa se multiplicaron por la concentración de carbono medido por combustión seca en un analizador automático de carbono orgánico total (Shimadzu 5000).

### Carbono orgánico del suelo (COS)

Las muestras de suelo se obtuvieron en año 2009 (COS inicial) en los mismos sitios de

muestreo, en los incrementos de profundidad: 0-15 y 15-30cm, con ayuda de una barra de 8cm de diámetro. Cada muestra de suelo se colocó en bolsas de plástico y se secaron a una temperatura de 60°C durante 48h, después se molieron en un mortero de ágata y se tamizaron por malla 100 (0,14mm). En forma manual se removieron las raíces, piedras y otros materiales, y una vez libre de estos materiales se tomó una submuestra de aproximadamente 0,15g para la determinación de carbono. El carbono se determinó mediante un analizador automático de carbono total. Para el cálculo de COS (Mg·ha<sup>-1</sup>) se obtuvo la densidad aparente (Da) mediante el método del cilindro, como la relación entre el peso del suelo seco y el volumen del suelo. El peso de suelo seco fue sin considerar el peso de los residuos vegetales (RV) y piedras. El volumen del suelo, se calculó al descontar del volumen total, el volumen de RV y piedras. El cálculo del COS se efectuó usando el enfoque de Ellert y Bettany (1995). Este método elimina el efecto de la diferencias en la masa del suelo debido a prácticas de manejo, cuando se comparan las cantidades de C en suelos bajo cambio de uso del suelo, lo que se logra con el uso de una masa equivalente de suelo (MES) conforme las ecuaciones de Ellert y Bettany (1995):

$$T_{add} = (M_{suelo, equiv} - M_{suelo, superficial}) / \rho_b,$$

donde  $T_{add}$ : espesor adicional de la capa subsuperficial, necesario para obtener la MES (m);  $M_{suelo, equiv}$ : MES, es la masa de suelo con mayor peso (Mg·ha<sup>-1</sup>);  $M_{suelo, superficial}$ : masa de suelo en la capa superficial u horizonte genético (Mg·ha<sup>-1</sup>);  $\rho_b$ : densidad aparente de la capa subsuperficial (Mg·m<sup>-3</sup>). También se obtuvo la masa de C equivalente:

$$M_{carbono, equiv} = M_{carbono, superficial} + M_{carbono, Tadd}$$

donde  $M_{carbono, equiv}$ : masa de C por unidad de área en una MSE (Mg·ha<sup>-1</sup>);  $M_{carbono, superficial}$ : masa de C en la capa superficial del

suelo (Mg·ha<sup>-1</sup>); y  $M_{carbono, Tadd}$ : la masa de C adicional en la capa subsuperficial del suelo (Mg·ha<sup>-1</sup>).

### Modelo RothC 26.3

El modelo RothC de Coleman y Jenkinson (1996) es un modelo de múltiples compartimentos. Por su velocidad de descomposición cuatro compartimentos son activos y uno es pasivo: i) material vegetal de fácil descomposición (MVD; que permanece en el suelo por 0,165 años); ii) material vegetal resistente (MVR; 2,71 años); iii) biomasa microbiana (BIO; 1,69 años); iv) materia orgánica humificada (HUM; 49 años); y v) materia orgánica inerte (MOI; con duración en el suelo de 1980 años). Durante la simulación del RothC, los RV que entran al suelo se separan en MVD y MVR, dependiendo del origen (cultivos, pastizales o bosques); estos se descomponen para formar BIO, HUM y CO<sub>2</sub> en función del contenido de arcilla del suelo. La BIO y el HUM generados se descomponen para producir más BIO y HUM. Los compartimentos activos experimentan descomposición por cinética de primer orden, y cada uno presenta una tasa constante de descomposición (k) por año para MVD (10), MVR (0,3), BIO (0,66), y HUM (2). La descomposición del compartimento activo está dado por la expresión

$$Y = Y_0 (1 - e^{-abct})^c$$

donde:  $Y_0$ : C inicial; a, b y c: factores que modifican a k (temperatura, humedad y cobertura del suelo, respectivamente); y t= 1/12 para obtener la tasa de descomposición al final de cada mes. La MOI (Mg·ha<sup>-1</sup>) es obtenida de acuerdo con Fallon *et al.* (1998) por

$$MOI = 0,049 \times COT^{1,139}$$

donde COT: carbono orgánico total (Mg·ha<sup>-1</sup>). Los parámetros de entrada incluyen temperatura del aire (TPM; °C), precipitación (PPM; mm), evaporación promedio mensual (EPM; mm), contenido de arcilla, profun-

did de muestreo del suelo, entrada mensual de C de RV y abonos orgánicos (AO), información mensual de la cobertura del suelo (si el suelo está desnudo o con cobertura vegetal) y la relación MVD/MVR. La relación MVD/MVR que recomienda el RothC por defecto es un valor de 0,25 para la vegetación forestal (por ejemplo, el 20% de los restos vegetales son MVD y el 80% es MVR); de 1,44 para los cultivos y pastos con manejo (59% MVD y 41% MVR); y de 0,67 para los pastos no explotados y matorrales, incluyendo sabanas (Coleman y Jenkinson 1996).

La información climática de los sitios de estudio se obtuvo de la estación climática N° 14085, La Huerta (CNA, 2014), para un periodo de tiempo comprendido entre 1970 y 2012. Los parámetros como porcentaje de arcilla del suelo, así como el aporte de C de los RV se obtuvieron en el año 2009.

### Simulación de la dinámica del COS

La simulación de los cambios de COS con el RothC consistió en las etapas de inicialización y elaboración de escenarios. En ambas etapas se hicieron simulaciones en las profundidades de suelo dec 0-15 y 0-30cm. Este último fue la suma del COS 0-15 y 15-30cm.

En la inicialización, el COS inicial en las profundidades de suelo 0-15 y 0-30cm se estimó en 22 y 51Mg·ha<sup>-1</sup>, respectivamente, y corresponde al cultivo de maíz bajo condiciones de riego de acuerdo con la información de la Carta de Uso de Suelo y vegetación de la Comisión de Estudios del Territorio Nacional (CETENAL) 1976 con fotografía aérea del año 1971. El RothC se ejecutó iterativamente 10.000 años con la información medida y asumida por el modelo (Tabla I) para obtener el contenido inicial de C de los compartimentos activos en la condición

TABLA I  
INFORMACIÓN NECESARIA EN LA SIMULACIÓN DE LOS CAMBIOS DE CARBONO ORGÁNICO DE SUELO (COS) CON EL MODELO ROTH C EN LOS SITIOS CON LAS PLANTACIONES DE ESPECIES TROPICALES ARBÓREAS

Parámetro	Plantación		Con manejo		Sin manejo	
	Melina	Teca	Rosa morada	Parota	Rosa morada	
Inicialización-COS <sub>0-15</sub>						
% arcilla	32	24	31	40	31	
CVS (meses)	8	8	8	8	8	
RV <sub>ROTHC</sub> (Mg·ha <sup>-1</sup> )	2,67	2,67	2,67	2,67	2,67	
MOI (Mg·ha <sup>-1</sup> )	1,74	1,74	1,74	1,74	1,74	
MVD/MVR	1,44	1,44	1,44	1,44	1,44	
Escenario-COS <sub>0-15</sub>						
RV <sub>medido</sub> (Mg·ha <sup>-1</sup> )	5,1	3,2	3,0	7,4	5,0	
MVD/MVR	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	
CVS (meses)	12	12	12	12	12	
Inicialización-COS <sub>0-30</sub>						
% arcilla	32	24	31	40	31	
CVS (meses)	8	8	8	8	8	
RV <sub>ROTHC</sub> (Mg·ha <sup>-1</sup> )	6,08	6,08	6,08	6,08	6,08	
MOI (Mg·ha <sup>-1</sup> )	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	
MVD/MVR	1,44	1,44	1,44	1,44	1,44	
Escenario-COS <sub>0-30</sub>						
RV <sub>Medido</sub> (Mg·ha <sup>-1</sup> )	6,6	3,9	3,7	9,3	6,3	
MVD/MVR	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	
CVS (meses)	12	12	12	12	12	
MOI	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	
MVD/MVR	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	

CVS: cobertura vegetal del suelo, RV: residuos vegetales, MOI: materia orgánica inerte, MVD: material vegetal de fácil descomposición, MVR: material vegetal resistente.

de uso de suelo considerado como línea base.

La elaboración de escenarios se efectuó en dos periodos: el primero fue 23 años (1971-1993) con información de manejo suelo del cultivo de maíz hasta el establecimiento de las plantaciones forestales (Tabla I), y el segundo fue de 100 años (1994-2093) con información del manejo de suelo de la plantación forestal, muestreo de COS y residuos vegetales medidos en el año 2009 (Tabla I). En este último, las tendencias de los cambios del COS se obtuvieron con los mejores valores de los parámetros de desempeño del RothC, que se indican en el apartado siguiente.

### Análisis

Los datos de COS, hierbas y arbustos, hojarasca y raíces de los sistemas en estudio se analizaron aplicando un análisis de varianza (ANOVA) con el programa SAS v.9 para detectar diferencias significativas. El desempeño del modelo fue evaluado con los pares de COS observados y simulados del año 2009 (año de medición de COS) en las profundidades de suelo 0-15 y 0-30cm. En esta evaluación se usaron los estadísticos coeficiente de correlación (r), raíz cuadrada del cuadrado medio del error (RCCME), eficiencia del modelo (EF) de Smith *et al.* (1997), además del coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>) y el parámetro m de la ecuación de regresión lineal simple. La tasa de cambio anual se obtuvo en los periodos de 20, 40 y 100 años, con la ecuación

$$TC = \frac{COS_{final} - COS_{inicial}}{\# \text{ años}}$$

donde TC: tasa de cambio (Mg C ha<sup>-1</sup>/año); y # años: número de años con el manejo de la plantación forestal para obtener la tasa de cambio en los periodos de 20, 40 y 100 años.

### Resultados

El carbono orgánico del suelo (COS) medido después de 15 años de cambio de uso del suelo (CUS) de agrícola a forestal en las cuatro especies arbóreas se muestra en la Tabla II. En general el COS se almacenó entre 53 y 60% en los primeros 15cm de profundidad del suelo, valor similar al promedio de 64% reportado en sistemas forestales de la sierra norte de Oaxaca, que incluyó especies tropicales (González *et al.*, 2008). Las plantaciones sin manejo de hierbas (SM) con parota y rosa morada almacenaron más C en el suelo que aquellas con manejo (CM). Según Masera *et al.* (1997), cuando se mantiene la cobertura forestal o se renueva en sucesivas rotaciones, sin sobreexplotación, se crea un sumidero de carbono que puede ser estable en el tiempo. En el caso de parota tuvo mayor COS que puede explicarse, de acuerdo

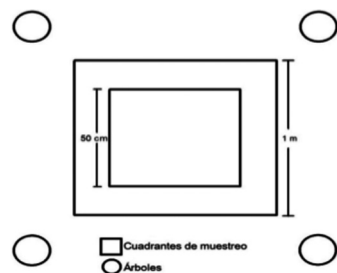


Figura 1. Muestreo de hierbas-arbustos y hojarasca.

TABLA II  
CARBONO ORGÁNICO DE SUELO (MEDIA ±DE; Mg·ha<sup>-1</sup>) MEDIDO EN PLANTACIONES CON ESPECIES TROPICALES ARBÓREAS, EN LAS PROFUNDIDADES DE SUELO 0-15, 15-30 Y 0-30 CM

Sistema	Con manejo			Sin manejo	
	Melina	Teca	Rosa morada	Parota	Rosa morada
COS (cm)	- Mg·ha <sup>-1</sup> -				
COS <sub>0-15</sub>	33,5 ±8,5	30,5 ±6,9	27,1 ±13,6	41,9 ±5,8	35,1 ±11,7
COS <sub>15-30</sub>	16,2 ±4,1	25,2 ±4,6	23,8 ±11,3	31,6 ±6,7	28,8 ±9,1
COS <sub>0-30</sub>	49,7 ±10,3	55,7 ±10,8	50,9 ±22,3	73,4 ±11,0	63,9 ±19,9

DE: desviación estándar.

con Mooney (1972), porque es una leguminosa que mantiene relaciones simbióticas con microorganismos del suelo, fija nitrógeno en sus raíces y su tasa fotosintética aumenta, lo que permite mayor acumulación de C en sus órganos.

El aporte de C al suelo por los residuos vegetales: hierbas y arbustos, hojarasca y raíces no presentó diferencias estadísticas significativas (Tabla III); sin embargo, las plantaciones SM tuvieron mayor cantidad C aportado por la hojarasca. Así,

al comparar rosa morada SM y CM, la diferencia fue de 2,4Mg·ha<sup>-1</sup>. La cantidad de RV total en plantaciones SM fue superior, resultado del aporte del C de las hierbas y arbustos, y esto también resultó para la especie melina CM, que tuvo alta producción de hojarasca. Jaramillo *et al.* (2003), en chamele cerca de la costa de Jalisco, en un bosque tropical inundado con *Tabebuia rosea* (rosa morada) entre las especies comunes, reportan un promedio de hojarasca de 5,7Mg

TABLA III  
APORTE DE CARBONO DE RESIDUOS VEGETALES AL SUELO DE ESPECIES

Sistema	Con manejo			Sin manejo	
	Melina	Teca	Rosa morada	Parota	Rosa morada
Componente	- Mg·ha <sup>-1</sup> /año -				
Hojarasca	5,8 a	3,1 a	2,9 a	6,4 a	3,5 a
Hierbas y arbustos	0,0	0,0	0,0	2,1 a	1,9 a
Raíces	2,0 a	2,1 a	2,0 a	2,1 a	2,4 a
RV total	6,6	3,9	3,7	9,3	6,3

RV: residuos vegetales. Valores con letras iguales en cada columna son estadísticamente iguales con α= 0,05 de acuerdo a la prueba de Tukey.

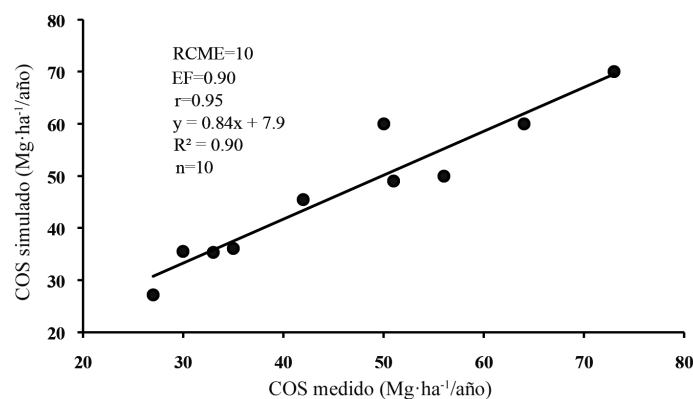


Figura 2. Desempeño del RothC 26,3 en suelos con plantaciones arbóreas tropicales en dos profundidades de suelo 0-15 y 0-30cm.

C ha<sup>-1</sup>/año. También en chamele, Campo *et al.*, (2016) reportan para un bosque tropical caducifolio con 23% de presencia de leguminosas un promedio de hojarasca de 2,1Mg C ha<sup>-1</sup>/año. La diferencia en producción de hojarasca depende de la productividad del ecosistema según la temperatura ambiental y cantidad de precipitación anual (Aber y Melillo *et al.*, 1991) y de la estacio-

nalidad de la lluvia, más que de la cantidad de lluvia anual, además de la capacidad del suelo para conservar el agua (Galicia *et al.*, 1999).

Al comparar la cantidad de hojarasca por especie, esta fue mayor en melina CM, parota SM y rosa morada SM, resultados que siguieron una tendencia similar a los de Jiménez *et al.* (2013) en Nicaragua, donde el almacén de C en hojarasca por árbol fue de 9,4, 2,5 y 2,1kg/árbol para melina, parota y rosa morada. En el caso de teca, en nuestro estudio la cantidad de hojarasca (3,1Mg C ha<sup>-1</sup>/año) es cercano al obtenido para teca de 8 años en Ecuador, Brasil y Costa Rica (3,3, 2,2 y 2,3Mg C ha<sup>-1</sup>/año de hojarasca, respectivamente (Landeta, 2009).

Antes de simular las tendencias del COS, se evaluó el desempeño del modelo del RothC al comparar los pares de valores de COS medido y simulados con el RothC bajo plantaciones de especies tropicales arbóreas (Figura 3). El valor del coeficiente de correlación, la asociación entre pares de valores medidos y simulados, fue positiva (0,95). Con respecto a los valores de RCME, EF y R<sup>2</sup> (21%, 90 % y 0,93, respectivamente), estos fueron similares a los obtenidos por González *et al.* (2011), donde se agruparon algunos sistemas forestales de México con diferentes especies como el *Liquidambar*, *Alnus sp*, *Coffea arabica* L., acahuales y bosque espinoso tamaulipeco. En suelos bajo condiciones tropicales

TABLA IV  
CAMBIOS DE CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO (COS) EN 20, 40 Y 100 AÑOS DESPUÉS DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO DE AGRÍCOLA A FORESTAL EN PLANTACIONES FORESTALES (PROFUNDIDAD DE SUELO 0-30cm)

Especie	Melina (CM)	Teca (CM)	Rosa morada (CM)	Parota (SM)	Rosa morada (SM)
	- (Mg·ha <sup>-1</sup> ·año <sup>-1</sup> ) -				
Años después CUS					
20	0,4	-0,3	-0,2	1,0	0,3
40	0,3	-0,2	-0,2	0,7	0,2
100	0,1	-0,1	-0,1	0,3	0,1

CUS: cambio de uso de suelo, CM: con manejo, SM: sin manejo.

del Amazonas en Brasil, Cerri *et al.* (2007) en cronosecuencias de cambio de uso de suelo de bosque a pastizal, reportó valores de desempeño del RothC de RCME= 17% y R<sup>2</sup>=1,07.

Una vez obtenida la mejor prueba de desempeño del RothC, se obtuvo la tasa de cambio de COS en las plantaciones forestales de estudio, sin manejo y con manejo, en los periodos de tiempo de 20, 40 y 100 años después del CUS de agrícola a forestal (Tabla IV). El potencial de secuestro de COS (Mg·ha<sup>-1</sup>/año) de las plantaciones después de 40 años del CUS fue, de mayor a menor: parota (SM; 0,3-0,7); melina (CM; 0,1-0,3); rosa morada (SM; 0,1-0,2); y rosa morada (CM) y teca (CM) ambas -0,1 a -0,2 (Tabla IV, Figura 3). Estos valores son cercanos al promedio estimado en el estudio de Post y Kwon (2000), quienes reportan una tasa promedio de secuestro de 0,34Mg C ha<sup>-1</sup>/año, cuando se establecen plantaciones forestales. El orden de secuestro obtenido en el presente

estudio fue inverso al orden en que el COS alcanza el estado de equilibrio: rosa morada (CM)>teca (CM)>rosa Morada (SM)>melina>parota. Esto puede explicarse por el tiempo de conversión o cambio del COS, que según Jenkinson y Rayner (1977) es la relación entre el COS y la entrada anual de RV, y se da por el movimiento del C orgánico (migración), a través de un volumen dado de suelo. El tiempo de conversión en rosa morada (CM) y teca (CM) fue de 14 años, en rosa morada (SM) de 9 años, en melina (CM) de 8 años y en parota (SM) de 6 años. Así, los valores de tiempo más altos de conversión indican que la estabilización del C en el suelo es mayor por una baja entrada de RV, como en rosa morada CM, teca (CM) y rosa morada (SM) que en estos casos ocasiona pérdidas de COS, mientras que caso contrario ocurrió en parota, que tiene mayor entrada de RV y tarda mayor tiempo en alcanzar el estado de equilibrio. Estos resultados estuvieron de acuerdo con las simulaciones de COS reportadas por Yocosawa *et al.*, (2010) y por González *et al.*, (2014) para este parámetro.

Se encontró que hay una relación directa entre la entrada de C al suelo de los RV y la tasa de cambio, en las especies melina y parota que tienen valores mayores de RV de 6,6 y 9 Mg C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> y tasas de cambio de COS 0,3 y 0,1 Mg C ha<sup>-1</sup>/año a los 100 años de simulación, respectivamente (Tablas III y IV). También se mostró que las tasas de cambio de COS fueron menores o negativas en los sistemas con

manejo en relación a los sistemas sin manejo, como es el caso de rosa morada y teca, ambas sin manejo en la profundidad 0-30cm, entre -0,1 y -0,2 Mg C ha<sup>-1</sup>/año.

### Conclusiones

De acuerdo a los resultados del presente estudio, el uso de modelos de la dinámica del carbono como el RothC, resultó ser una herramienta útil para obtener las tendencias de los cambios de carbono orgánico del suelo después del cambio de uso de suelo de agrícola a forestal. También se identificaron especies forestales con potencial de secuestro de este elemento a largo plazo en experimentos de corta duración que en el caso de Latinoamérica, donde suceden las mayores pérdidas de este elemento por deforestación y se disponen de bases de datos de esta duración. Parota, una leguminosa, aportó la mayor cantidad de C al suelo y produjo mayor cantidad de hojarasca, seguida de la especie melina con manejo, mientras que rosa morada y teca sin manejo tuvieron tasas de cambio de COS negativas.

### Recomendaciones

Continuar con el monitoreo del COS, la historia de uso de suelo, entrada de carbono al suelo por residuos vegetales en experimentos en sistemas forestales, a fin de obtener bases de datos de larga duración y continuar evaluando y ajustando el desempeño del modelo para reducir las incertidumbres inherentes al uso de estos modelos.

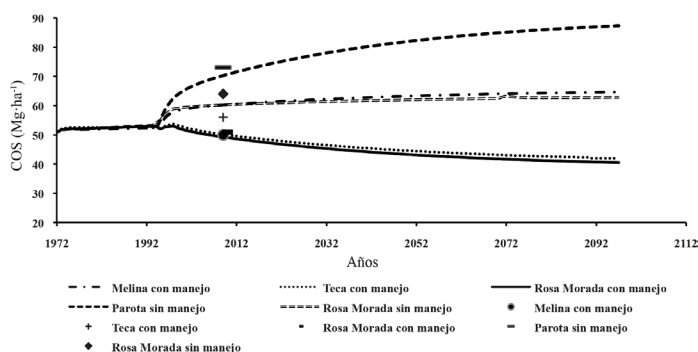


Figura 3. Simulación de los cambios de carbono orgánico del suelo con el modelo RothC después del cambio de uso de suelo de agrícola a plantación de cuatro especies tropicales arbóreas.

## REFERENCIAS

- Aber JD, Melillo JM (1991) *Terrestrial Ecosystem*. Saunders. Philadelphia, PA, EEUU. 556 pp.
- Batjes NH (1996) Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *Eur. J. Soil Sci.* 47: 151-163.
- CETENAL (1976) *Carta Uso de Suelo y Vegetación. E13-B-22*. 1: 50 000. Proyección UTM. Fotointerpretación 1:25 000 de 1971. Casimiro Castillo. Jalisco, México.
- Ellert BH, Bettany JR (1995) Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting on management regimes. *Can. J. Soil Sci.* 75: 529-538.
- Eswaran H, Van Den Berg E, Reich P (1993) Organic carbon soils of the world. *Soil Sc. Soc. Am. J.* 57: 192-194.
- Campo JF, García OA, Navarrete S, Siebe C (2016) Almacenes y dinámica del carbono orgánico en ecosistemas forestales tropicales de México. *Terra Latinoam.* 34: 31-38.
- Cerri C., Easter M, Paustian, K, Killian K, Coleman K, Bernoux M, Falloon P, Powlson D, Batjes N, Milne N, Cerri C (2007) Simulating SOC changes in 11 Land use Change chronosequences from the Brazilian Amazon with RothC and Century models. *Agric. Ecosyst. Environ.* 122: 46-57.
- Coleman K, Jenkinson DS, Crocker G, Grace P, Klir J, Korschens M, Poulton P, Richter D (1997) Simulating Trends in Soil Organic Carbon in Long-Term Experiments Using RothC-26.3. *Geoderma* 81: 29-44.
- Coleman K, Jenkinson DS (1996) RothC 26.3 -A model for the turnover of carbon in soil. En Powlson DS, Smith P, Smith JU (Eds.) *Evaluation of Soil Organic Matter Models Using Existing, Long-Term Datasets*. NATO ASI Series I, Vol. 38. Springer. Berlín, Alemania. pp. 237-246.
- CNA (2014) *Comisión Nacional del Agua*. <http://smn.cna.gob.mx/climatologia/normales/estacion/mich/NORMAL14085.TXT> (Cons. 09/10/2014).
- Falloon P, Smith P, Coleman K, Marshall S (1998) Estimating the size of the inert organic matter pool from total soil organic carbon content for use in the Rothamsted carbon model. *Soil Biol. Biochem.* 30: 1207-1211.
- Galicia L, López BJ, Zarco AAE, Filips V, García OF (1999) The relationship between solar radiation interception and soil water content in a tropical deciduous forest in Mexico. *Catena* 36: 153-164.
- García E (1998) *Climas* (Clasificación de Köppen, modificado por García). Escala 1:1 000 000. Comisión Nacional de Biodiversidad. México.
- Gonzalez L, Etchevers J, Paz F, Díaz H, Fuentes M, Covaleta S, Pando M (2011) Performance of the RothC 26.3 model in short term experiments in Mexican sites and systems. *J. Agric. Sci.* 149: 415-425.
- González-Molina L, Etchevers-Barra JD, Hidalgo-Moreno C (2008) Carbono en suelos de ladera: Factores que deben considerarse para determinar su cambio en el tiempo. *Agrociencia* 42: 741-751.
- González M, Etchevers Barra JD, Paz Pellat F, Carrillo, A F, Acosta, Mireles M, Báez PA (2016) Desempeño del modelo rothc-26.3 a nivel de parcela en México. *Terra Latinoam.* 34: 357-366.
- González M, Acosta M, Carrillo F, Báez A, González CJ (2014) Cambios de carbono orgánico del suelo bajo escenarios de cambio de uso de suelo en México. *Rev. Mex. Cienc. Agric.* 5: 1275-1285.
- IPCC (1997). Revised (1996) *IPCC Guidelines for National Greenhouse Inventories. Reference Manual*. Vol. 3. En Houghton JT, Meira Filho LG, Lim B, Tréanton K, Mamaty I, Bonduki Y, Griggs DJ, Callander BA (Eds.) *Chapter 5: Land use Change and Forestry*. Cambridge University Press: Cambridge and New York. pp. 44-45.
- IPCC (2013) Climate Change: The physical science basis. En Stocker T F, Qin D, Plattner GK, Tignor MMB, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM (Eds.) *Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. Cambridge, RU. pp. 50-51.
- Jaramillo VJ, Boone KJ, Rentería LR, Cummings DL, Ellingson LJ (2003) *biomass, carbon, and nitrogen pools in Mexican tropical dry forest landscapes. Ecosystems* 6: 609-629.
- Jenkinson, DS, Rayner, JH (1977) The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments. *Soil Sci.* 123: 298-305.
- Jiménez GRM, González MAJ, Palacios JDA, Pérez CJ, Rojas HJ, Maritza A. Bustos LMA, Chavarría Ñ FJ (2013) Crecimiento y potencial de secuestro y fijación de carbono de seis especies forestales con el sistema agroforestal taungya en Rivas, Nicaragua. En *Agroforestería en las Américas* Nº 50. pp. 109-113.
- Landeta González AD (2009) *Producción de biomasa y fijación de carbono en plantaciones de Teca (Tectona grandis Linn. F) en la ESPOL Campus Ing. Gustavo Galindo*. Tesis. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Guayaquil, Ecuador. 109 pp.
- Masera O, Ordóñez M.J, Dirzo R (1997) Carbon emissions from Mexican forests: current situation and long-term scenarios. *Climatic Change* 35: 265-295.
- Márquez L (1997) *Validación de Campo de los Métodos del Instituto Winrock para el Establecimiento de Parcelas Permanentes de Muestreo para Cuantificar Carbono en Sistemas Agroforestales*. Universidad del Valle de Guatemala. 45 pp.
- Monney HA (1972) Carbon balance of plants. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 3: 315-346.
- Post WM, Kwon C (2000) Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential. *Global Change Biol.* 6: 317-237.
- Rzedowski D, McVaugh RR (1966) *La Vegetación de la Nueva Galicia*. University of Michigan Herbarium. Detroit, MI, EEUU. 123 pp.
- Smith P, Smith JU, Powlson DS, McGill WB, Arah JRM, Chertov OG (1997) A comparison of the performance of nine soil organic matter models using datasets from seven long-term experiments. *Geoderma* 81: 153-225.
- Trejo I, Dirzo R (2000) Deforestation of seasonally dry tropical forest: a national and local analysis in Mexico. *Biol. Conserv.* 94: 133-142.
- Viaud V, Angers DA, Walter C (2010) Towards landscape-scale modeling of soil organic matter dynamics in agroecosystems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 74: 1-14.
- Yokozawa M, Shirato S, Sakamoto T, Yonemura S, Nakai M, Toshiaki O (2010) Use of the RothC model to estimate the carbon sequestration potential of organic matter application in Japanese arable soils. *Soil Sci. Plant Nutr.* 56: 168-176.