

# ESTIMACION DEL SECUESTRO DE CARBONO EN SUELOS BAJO MASAS FORESTALES DE *PINUS HALEPENSIS* EN CASTILLA Y LEÓN (ESPAÑA)

Elena Charro Huerga<sup>1</sup>, Salvador Hernández Navarro<sup>2</sup>, Jesús Martín Gil<sup>2</sup>, Amelia Moyano Gardini<sup>3</sup> y Norlan Ruiz Potosme<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dpto de Ciencias Agroforestales. ETSIIAA. Avda Madrid. 34004-PALENCIA (España)

<sup>2</sup>Dpto de Ingeniería Agrícola y Forestal. ETSIIAA. Avda Madrid. 34004-PALENCIA (España)

<sup>3</sup>Dpto de Producción Vegetal. ET Ingenierías Agrarias. 42004-SORIA (España)

## Resumen

Los ecosistemas forestales pueden almacenar cantidades sustanciales de carbono, tanto en el suelo como en la biomasa. Una vez que un bosque ha alcanzado su madurez, éste no acumula más carbón, y por lo tanto, la capacidad de un bosque para secuestrar carbono debe ser analizado en función de las distintas perturbaciones que puede sufrir, tales como el cambio climático o los cambios de uso. Convertir suelos agrícolas en forestales supondrá un secuestro de carbono considerable durante varias décadas. Sin embargo, la ausencia de datos y experimentos a largo plazo impiden estimar el poder de secuestro de los ecosistemas forestales, bien sea en función de las especies arbóreas o del manejo del propio ecosistema. Existen diversos modelos que analizan la dinámica de la materia orgánica en los suelos, y permiten predecir la capacidad de almacenaje de carbono para un cierto ecosistema a largo plazo. Extensas áreas dedicadas a la agricultura en la región mediterránea fueron abandonadas durante la segunda mitad del siglo XX, y en la actualidad constituyen áreas reforestadas de diversas especies vegetales. Para simular la acumulación de materia orgánica en los suelos forestales de diversos pinares castellanos se ha utilizado el modelo RothC. Este modelo utiliza datos climáticos así como edáficos para llevar a cabo una previsión de la capacidad de secuestro del sistema bajo estudio. En este trabajo se han seleccionado varios bosques de repoblación de *Pinus halepensis* en Castilla, en concreto en las provincias de Valladolid y Palencia. Los resultados muestran como el incremento en el stock de C por parte de los suelos forestales es notorio, aunque con el transcurso de los años, el incremento es cada vez menor, dado que el sistema se aproxima a su equilibrio.

Palabras clave: *Modelo, Secuestro del C, Suelos forestales, Pinus halepensis*

## INTRODUCCIÓN

El incremento en la atmósfera de los llamados gases de invernadero (GHG) y el consecuente cambio climático tendrán efectos importantes en el siglo XXI. La creciente preocupación sobre los efectos potencialmente desastrosos del calentamiento global en varias

regiones del mundo se está enfrentando con la incapacidad de muchos países de reducir sus emisiones netas de gases de invernadero en la medida y en la extensión requeridas por el Protocolo de Kyoto. Las negociaciones dentro del protocolo de Kyoto han mostrado una tendencia a la ampliación de las varias opciones reconocidas para la compensación de las emisio-

nes de gases de invernadero. En el pasado había opiniones variadas respecto a si la captura de carbono en los suelos sería realista, práctica y una opción a largo plazo. En los últimos años, se ha acumulado evidencia en favor de esos aspectos. Si bien los escenarios exactos todavía son inciertos, son de esperar serios efectos negativos -aunque se esperan también algunos efectos positivos- por lo que es esencial que sean tomadas un cierto número de medidas para reducir las emisiones de gases de invernadero y para incrementar su captura en los suelos y en la biomasa. Para ello, deben ser desarrolladas nuevas estrategias y políticas apropiadas para el manejo de la agricultura y los bosques. Una opción se basa en la captura de carbono en los suelos o en las biomásas terrestres, sobre todo en las tierras usadas para la agricultura o la forestación. A partir del Protocolo de Kyoto esto se conoce como Uso de la Tierra, Cambio en el *Uso de la Tierra y Forestación* (LULUCF) y concierne los artículos 1.3 y 1.4 del Protocolo (IPPC, 2000).

El Protocolo de Kyoto reconoce que las emisiones netas de carbono pueden ser reducidas ya sea disminuyendo la tasa a la cual se emiten a la atmósfera los gases de invernadero o incrementando la tasa por la cual esos gases son retirados de la atmósfera gracias a los sumideros. Los suelos agrícolas están entre los mayores depósitos de carbono del planeta y tienen potencial para expandir el secuestro de carbono y de esta manera mitigar la creciente concentración atmosférica de CO<sub>2</sub>. Dentro del contexto del Protocolo de Kyoto y las subsiguientes discusiones de la Conferencia de las Partes, hay un cierto número de características que hacen que el secuestro de carbono en las tierras agrícolas y forestales pueda ofrecer posibilidades de estrategias atractivas de modo de mitigar el incremento en la atmósfera de las concentraciones de gases de invernadero. El Artículo 3.4 del protocolo de Kyoto parece permitir la expansión de los sumideros creados por la intervención humana. Los recientes acuerdos post-Kyoto consideran los sumideros en los países y reconocen el potencial fundamental de la agricultura, de las tierras de pastoreo y de los suelos forestales para capturar carbono.

En los próximos 25 años, para estimar el potencial de captura de carbono en suelos bajo distintos escenarios (BATJES, 1999) será necesari-

rio distinguir dos aspectos: cuál es la existencia original de carbono en el suelo y cuáles son los cambios en las existencias de carbono. En el ciclo terrestre del carbono, el carbono orgánico del suelo representa la mayor reserva en interacción con la atmósfera y se estima en cerca de 1 500 Pg C a 1m de profundidad cerca de 2456 a 2 m de profundidad). El carbono inorgánico representa cerca de 1700 Pg pero es capturado en formas más estables tales como el carbonato de calcio. La vegetación (650 Pg) y la atmósfera (750 Pg) almacenan considerablemente menos cantidades que los suelos. La materia orgánica que está sobre la superficie del suelo no es tomada en consideración en la evaluación de las existencias de carbono del suelo. En los suelos cultivados, esto significa que los residuos vegetales son considerados una fase transitoria; sin embargo, los residuos superficiales de los cultivos, los cultivos de cobertura o la cobertura en si misma son partes importantes del agrosistema. Del mismo modo, los residuos de los bosques pueden llegar a 8 o 9 kg C.m<sup>-2</sup> en los bosques de zona templada (DUPOUEY et al., 1999) y a 5 o 6 kg C.m<sup>-2</sup> en un bosque tropical sobre un ferralsol (ANDREUX & CHONÉ, 1993). Las raíces vivas son consideradas como biomasa de carbono y en las tierras de pastoreo, por ejemplo, pueden contribuir con la mayor parte del carbono del suelo.

Los bosques cubren el 29% de las tierras y contienen el 60% del C de la vegetación terrestre. El carbono almacenado en los suelos forestales representa el 36% del total del carbono del suelo. Los ecosistemas forestales contienen más carbono por unidad de superficie que cualquier otro tipo de uso de la tierra y sus suelos -que contienen cerca del 40% del total del C- son de importancia primaria cuando se considera el manejo de los bosques. El almacenamiento de carbono y su liberación por los ecosistemas forestales -ya sea a causa de la forestación, la reforestación o la deforestación- están considerados en el Artículo 3.3 del Protocolo de Kyoto. Sin embargo, el Artículo 3.4 también se considera cuando se trata del manejo de bosques en zonas tropicales en razón de las importantes interacciones con la captura de carbono en los suelos. Por lo general, en los bosques naturales el carbono del suelo está en equilibrio, pero tan pronto como ocurre la deforestación -o la reforestación-, ese equilibrio es afectado.

Actualmente, se estima que cada año son deforestadas entre 15 y 17 millones de hectáreas, sobre todo en los trópicos (FAO, 1993) y que muy a menudo parte del carbono orgánico se pierde dando lugar a una considerable emisión de CO<sub>2</sub>. Por lo tanto, donde la deforestación no puede ser detenida, es necesario un manejo correcto para minimizar las pérdidas de C. La reforestación, sobre todo en los suelos degradados con bajo contenido de materia orgánica (MO), será una forma importante de secuestro de carbono a largo plazo, tanto en la biomasa como en el suelo.

Por otro lado, el desarrollo y uso de la modelización para evaluar los cambios en el stock de carbono en los suelos es una metodología que permite conocer la dinámica de la MO en base a los procesos de acumulación y descomposición de la misma (SPARLING *et al.*, 2003). Los cambios climáticos influirán en las velocidades de acumulación del carbono o descomposición en la MO, siendo los factores de los que dependen directamente estos procesos, la temperatura y la humedad, e indirectamente, los cambios en el crecimiento de la planta y la rizodeposición. Otros factores como el cambio en el uso del suelo o los distintos manejos del mismo también tienen una gran influencia.

Entre los modelos más utilizados destaca el modelo RothC que se aplica tanto a suelos forestales como agrícolas. Publicaciones recientes reflejan la utilidad del modelo, entre los que cabe destacar el estudio de ROMANYA *et al.* (2000), que utiliza el modelo en suelos españoles tanto forestales como agrícolas en la región mediterránea.

El objetivo de este trabajo es estimar el secuestro de carbono en suelos forestales de Castilla y León. Para ello se utilizara el modelo RothC. En este estudio, presentamos la modelización como herramienta para el estudio de la evo-

lución de la MO en los suelos. El uso de modelos constituye un método alternativo y complementario a las técnicas experimentales, a la hora de predecir resultados a medio y largo plazo. Es objetivo de este estudio, analizar la variación de la MO del suelo a largo plazo, con el propósito de cuantificar el secuestro de carbono que tendría lugar por parte de las masas forestales de *Pinus halepensis*, así como minimizar y prevenir la degradación edáfica por la pérdida de MO y garantizar un desarrollo sostenible en Europa.

## MATERIAL Y MÉTODOS

La modelización se realizó para un total de 5 pinares (*Pinus halepensis*) correspondientes a varios municipios de las provincias de Valladolid y Palencia. Estas masas forestales se encuentran sobre suelos que proceden de materiales no consolidados (exceptuando los depósitos aluviales recientes), que tienen un horizonte A óchrico. Los suelos se clasifican como Regosoles y se extienden por el centro de la depresión del Duero en las provincias de Burgos, Palencia, Segovia, Soria y Valladolid, preferentemente. Los análisis de laboratorio se han efectuado sobre muestras recogidas en los pinares hasta una profundidad de 35 cm. Diversos parámetros edáficos han sido determinados para estos suelos, contenido en carbono orgánico (CO), arcilla, limo y arena, así como el valor de pH, que aparecen recogidos en la tabla 1, donde puede verse también la localización de los pinares. La densidad aparente para estos suelos es en promedio de 1,35 g.cm<sup>-3</sup>.

El modelo utilizado, RothC-26.3 (JENKINSON 1990, COLEMAN Y JENKINSON 1995, 1996), está escrito en FORTRAN77, y permite calcular el *turnover* del CO en suelos utilizando como

Suelo	Municipio	Provincia	pH	CO	% Arcilla	%Limo	%Arena
Pinar 1	Dueñas	Palencia	8,82	3,92	7,05	5,25	87,70
Pinar 2	Peñafiel	Valladolid	8,90	7,53	7,55	55,15	37,30
Pinar 3	Fuentes de Navas	Palencia	8,30	10,54	26,35	27,10	46,55
Pinar 4	Cigales	Valladolid	8,30	15,06	15,40	16,70	67,90
Pinar 5	Dueñas	Palencia	8,59	21,68	18,60	27,80	53,60

**Tabla 1.** Parámetros edáficos experimentales para los 5 puntos de muestreo (CO en tn.ha<sup>-1</sup>)

entrada los aportes de la planta, pero sin predecir su crecimiento. Se trata de un modelo con aplicaciones prácticas, y permite evaluar la evolución del CO a largo plazo. Para llevar a cabo la simulación también se precisa disponer de datos climáticos (Tabla 2). La temperatura del aire y la pluviometría como medias mensuales utilizadas, se han extraído de diferentes centros meteorológicos y corresponden a valores promedio de los últimos 30 años.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El programa calcula entre otros valores, contenidos en el CO y las emisiones de dióxido de carbono, de forma mensual o anual, pudiendo hacerse la predicción para varias décadas o siglos. El modelo se va a aplicar para predecir la evolución de los contenidos en MO para los distintos pinares. Todas las cantidades se expresan en toneladas por hectárea.

En primer lugar, es preciso evaluar la cantidad de materia orgánica en los suelos al inicio de la repoblación, suponiendo que estos suelos se encontraban con anterioridad en un estado de equilibrio. En la tabla 3 se recogen los valores de Materia Orgánica Inerte (IOM), materia orgánica incorporada por el pino al propio suelo (CIP), así como la edad del pinar bajo estudio (EP). Todos estos valores han de ser ajustados tras sucesivos cálculos a fin de aproximarnos al valor actual de

CO en el año 2005, fecha en la que se recogieron las muestras. El programa RothC permite estimar el Carbono orgánico inicial (COI) en el año de la repoblación (AR). La combinación apropiada de ambos tipos de cálculos permite llegar a valorar la calidad del ajuste. Dos indicadores reflejan la validez de la modelización: 1) la figura 1 presenta la correlación entre el valor estimado de CIP y la EP. 2) la pequeña diferencia (DCO) entre valores predichos de CO en el año 2005 (COTEO-2005) y los experimentales (CO), mostradas en la tabla 4 es un indicio positivo. Una vez realizados los cálculos previos, es posible realizar una simulación a lo largo de un siglo, hasta el año 2105, como puede verse en la figura 2 y predecir el CO (CO2105). En la tabla 3 se puede encontrar este dato junto con el tanto por ciento incrementado (% ICO) en 100 años, así como la predicción del aumento de CO durante el año 2007-2008 (ICO2007-08) y el correspondiente al último año de la simulación (ICO2103-04). Comparando estos dos últimos valores se observa como la capacidad de secuestro del C por parte del suelo decrece conforme nos acercamos a la situación de equilibrio del pinar. Los estudios sobre secuestro de C en suelos forestales dependen mucho del tipo de vegetación sobre la que se asientan, y es difícil realizar un estudio comparativo. Sin embargo, recientemente, GRÜNZWEIG et al. (2007) basándose en inventarios de C, estiman una velocidad de acumulación de C en suelos forestales bajo *Pinus halepensis* de 0.50 tC ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup>, en promedio a lo largo de un período

Meses	Temperatura °C		Precipitación (mm)		ETP (mm)	
	Palencia	Valladolid	Palencia	Valladolid	Palencia	Valladolid
Enero	3	4	61	38	6,61	8,14
Febrero	4	5	43	33	10,32	13,17
Marzo	6	7	74	44	28,17	28,43
Abril	9	10	56	46	40,06	44,04
Mayo	13	14	65	36	67,32	74,48
Junio	16	18	40	33	101,48	105,71
Julio	19	20	18	15	120,13	133,73
Agosto	21	22	14	10	102,18	199,24
Septiembre	15	17	34	30	75,51	86,89
Octubre	10	13	84	46	49,92	50,71
Noviembre	5	7	107	50	20,35	20,26
Diciembre	2	4	88	41	8,75	8,94

Tabla 2. Datos mensuales meteorológicos de las zonas estudiadas

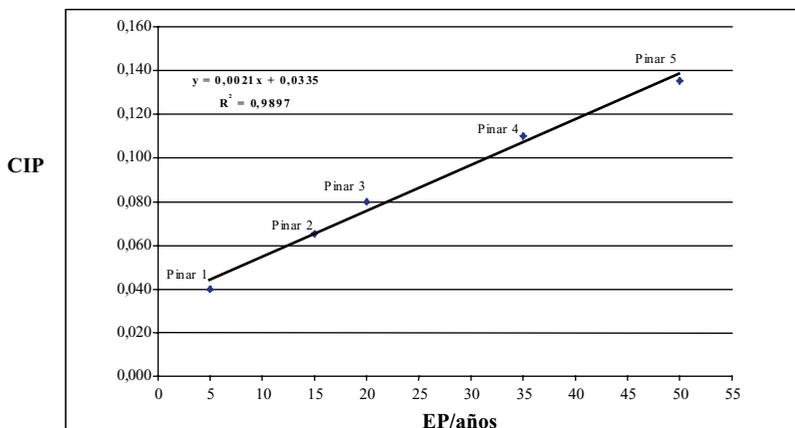


Figura 1. Correlación entre el CIP estimado según el modelo RothC y la edad del pinar (EP)

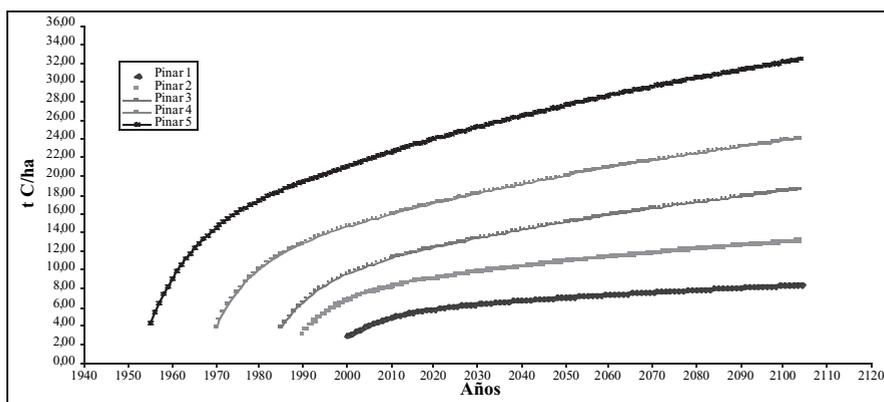


Figura 2. Simulación del secuestro de carbono a lo largo de 100 años para los distintos pinares

Muestras IOM	CIP	EP/años	COI (AR)	COTEO2005	DCO	CO2105	% ICO	ICO2007-08	ICO2103-04	
Pinar 1	0.5	0.040	5	2.92 (2000)	3.95	0.02	8.34	113.67	0.16	0.02
Pinar 2	0.5	0.065	15	3.12 (1990)	7.36	0.20	13.06	77.44	0.13	0.03
Pinar 3	0.5	0.080	20	3.76 (1985)	10.29	0.25	18.87	83.38	0.14	0.05
Pinar 4	0.5	0.110	35	3.78 (1970)	15.12	0.04	23.99	58.66	0.13	0.06
Pinar 5	0.5	0.135	50	4.29 (1955)	21.71	0.03	32.44	49.47	0.15	0.08

Tabla 3. Valores de diferentes parámetros ajustados mediante modelo RothC, así como valores de CO experimental y teóricos y predicciones a 100 años (tN ha<sup>-1</sup>)

de 35 años. Este valor es del mismo orden que el encontrado en este trabajo tras las simulaciones efectuadas, aunque todo apunta a que se trata de un valor sobreestimado para los suelos israelitas de estos autores.

**CONCLUSIONES.**

En primer lugar, el estudio demuestra como el desarrollo y uso de la modelización para evaluar los cambios en el stock de carbono en los

suelos es una metodología útil en suelos forestales. En segundo lugar, los resultados muestran como el incremento en el stock de C por parte de los suelos forestales es notorio, confirmándose éstos como un sumidero de carbono digno de tenerse en cuenta y no olvidar de contabilizar su contribución a mitigar el cambio climático. En tercer lugar, el secuestro de carbono es mayor en los primeros años, siendo con el transcurso de los años cada vez menor, debido a que el sistema se aproxima a su equilibrio. Finalmente, concluir que la reforestación es una estrategia importante a tener en cuenta no solo desde el punto de vista del cumplimiento del protocolo de Kyoto sino también de cara a evitar la degradación de los suelos por pérdida de materia orgánica, siendo la simulación del secuestro de carbono en suelos bajo masas de pinos, una herramienta que contribuirá a completar la evaluación del balance final de almacenaje de C por los bosques de Castilla y León.

### Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la Junta de Castilla y León (Proyectos VA094A06 y VA014A07) y el Ministerio de Educación y Ciencia (Proyecto CTM2006-02249/TECNO).

### BIBLIOGRAFIA

- ANDREUX, F. & CHONE, T.; 1993. *Dynamics of soil organic matter in the Amazon ecosystem and after deforestation: basis for efficient agricultural management*. Centre National de la Recherche Scientifique. Nancy.
- BATJES, N.H.; 1999. *Management options for reducing CO<sub>2</sub>- concentrations in the atmosphere by increasing carbon sequestration in the soil*. ISRIC. Wageningen, The Netherlands.
- CHARRO, E. Y MOYANO, A.; 2005. La Modelización como herramienta para el estudio de la degradación de suelos agrícolas por pérdida de materia orgánica. En: *Libro de Actas del II Simposio Nacional sobre Control de la Degradación de Suelos: 795-799*
- COLEMAN, K. & JENKINSON, D.S.; 1995. *RothC-26.3 – a model for the turnover of carbon in soil: Model description and users guide*. Lawes Agricultural Trust. Harpenden.
- COLEMAN, K. & JENKINSON, D.S.; 1996. *RothC-26.3 – a model for the turnover of carbon in soil: In: D.S. Powlson, P. Smith & J.U. Smith (eds.), Evaluation of soil Organic Matter Models using Existing, Long-Term Datasets, NATO ASI Series I. 38: 237-246* Springer-Verlag. Berling.
- DUPOUEY, J.L.; SIGUAND, G.; BATEAU, V.; THIMONIER, A.; DHOLE, J.F.; NEPVEU, G.; BERGÉ, L.; AUGUSTO, L.; BELKACEM, S. & NYS, C.; 1999. Stocks et flux de carbone dans les forêts françaises. *C.R. Acad. Agric. Fr.* 85(6): 293-310
- FAO.; 1993. *Forest Resources Assessment 1990, Tropical Countries*. FAO Forestry Paper 112. Rome.
- GRÜNZWEIG, J.M.; GELFAND, I.; FRIED, Y. & YAKIR, D.; 2007. Biogeochemical factors contributing to enhanced carbon storage following afforestation of a semi-arid shrubland. *Biogeosciences* 4: 891-904
- IPCC.; 2000. *Land use, land-use change, and forestry special report*. Cambridge University Press. Cambridge.
- JENKINSON, D.S.; 1990. The turnover of organic carbon and nitrogen in soil. *Philosophical transactions of the Royal Society*, B. 329: 361-368.
- ROMANYÁ, J.; CORTINA, J.; FALLON, P.; COLEMAN, K. & SMITH, P.; 2000. Modelling soil organic matter after planting fast-growing *Pinus radiata* on Mediterranean agricultural soils. *Eur. J. Soil Sci.* 51: 627-641.
- SPARLING, G.; PARFITT, R.L.; HEWITT, A.E. & SCHIPPER, L.A.; 2003. Three approaches to define desired soil organic matter contents *J. Environ. Quality* 32(3): 760-766.