

¿Cuánto carbono almacenan las plantaciones forestales?: un enfoque integral a partir de imágenes satelitales, datos de campo y el modelo CO₂Fix

Martín Sandoval¹, Juan F. Goya², Marcelo F. Arturi²

Palabras clave: C en suelo, C en biomasa, *Eucalyptus*

Introducción

Es conocida la capacidad de absorción de CO₂ atmosférico de las plantaciones forestales, sin embargo, no se encuentran registros de largo plazo en Argentina que evalúen esta capacidad y su importancia como mecanismo de mitigación del cambio climático. En ese contexto, el software CO₂Fix 3.1 es un modelo de simulación a nivel de ecosistema que cuantifica las existencias de C y los flujos en el bosque utilizando el llamado enfoque de contabilidad total de carbono y requiere parámetros de entrada relativamente sencillos (Schelhaas et al., 2004).

El objetivo de este trabajo es presentar una metodología de cuantificación de C en suelo y biomasa a partir de información a nivel regional derivada de imágenes satelitales, un modelo local de rendimiento de *Eucalyptus grandis* y datos simulados con el modelo CO₂Fix.

Materiales y Métodos

El área de estudio está definida por la cuenca de *E. grandis* en el N.E. de Argentina, desde el departamento de Paso de los Libres, Corrientes, a Gualaguaychú, Entre Ríos, durante el período comprendido entre los años 1985 y 2018.

Se efectuó una clasificación supervisada de la mediana de imágenes satelitales de la serie LANDSAT entre 1985 y 2018 con el algoritmo Random Forest (Breiman, 2001) en la plataforma Google Earth Engine (Gorelick et al., 2017), y se obtuvieron los valores de precisión para cada año. Las clases analizadas fueron: pastizal, *Eucalyptus spp*, *Pinus spp*, monte ribereño y agua. Los píxeles de las imágenes anuales se reclasificaron con valores de uno (1) para *Eucalyptus spp* y cero (0) para el resto de las coberturas, luego se obtuvo la suma acumulada de píxeles a lo largo del período

de estudio para estimar la edad. El número de rotaciones se obtuvo de la frecuencia de interrupciones en la señal de eucalipto, píxeles igual a cero. Este procesamiento se realizó en los programas QGIS y R. Los resultados obtenidos se validaron con rodales de edad conocida (n = 488) y se calculó el factor de corrección de superficie, definido como el complemento del porcentaje de detección promedio. No se evaluó el error en la estimación del número de rotaciones.

Con la función nls (Nonlinear Least Squares) en R se ajustó el modelo de rendimiento Chapman-Richards (Richards, 1959) para *E. grandis* a partir de datos de rodales muestreados a campo (n = 99) y se calculó el error absoluto medio de la estimación (EAM).

Se parametrizó el modelo de simulación CO₂Fix (Schelhaas et al., 2004) para *E. grandis* a partir de datos climáticos (Ramos et al., 2018), datos de campo de C en los primeros 30 cm de suelo (Sandoval, 2022), referencias bibliográficas de tasa de descomposición (Goya et al., 2008), de biomasa aérea (Goya et al., 1997), de raíces (Pérez et al., 2013), valores por defecto (Pérez Pérez et al., 2007) y el modelo de rendimiento construido. Se obtuvo el almacenaje de C orgánico del suelo (COS) y de C en la biomasa (CB) y total (CT) en suelos arenosos y francos para el período de estudio. Los valores simulados se contrastaron con valores obtenidos en campo y se calculó el EAM de la estimación. A los pastizales se le asignó 33,54 Mg/ha y 64,37 Mg/ha de COS y 5,01 Mg/ha y 9,62 Mg/ha de CB a partir de datos de campo para las familias de textura arenosa y franca, respectivamente (Sandoval, 2022).

En un sistema de información geográfica se integraron las edades y el número de rotaciones estimadas, el almacenamiento de COS y CB y CT a partir de los datos modelados y se presentaron los resultados gráficamente.

¹ Laboratorio de Investigación de Sistemas Ecológicos y Ambientales (LISEA) – Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales – UNLP. Contacto: dmartin-sandoval@gmail.com.

² Laboratorio de Investigación de Sistemas Ecológicos y Ambientales (LISEA) – Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales – UNLP.

Resultados

La clasificación supervisada de imágenes Landsat obtuvo valores de precisión promedio de 87 % ($\sigma = 5,1$ %) y de índice Kappa de 0,83 ($\sigma = 0,07$). El porcentaje de acierto promedio para los rodales de edad conocida fue del 71 % ($\sigma = 9$ %) y el factor de corrección fue de 38 %, 28 % y 22 % para los rangos de edades de 4 a 6, 7 a 9 y 10 o más años, respectivamente.

La superficie estimada de *Eucalyptus* spp en el año 1985 se incrementó de 44.321 ha a 77.338 ha en 2018 (de 55.863 a 99.340 ha corregidas) y se observó una estimación consistente del número de rotaciones.

El modelo de rendimiento ajustado se presenta en la Tabla 1 y no se observó un sesgo en la distribución de los residuos.

Tabla 1. Coeficientes de los parámetros del modelo de Chapman-Richards ajustado para estimar el rendimiento de plantaciones de *E. grandis*.

a	b	k	m	EAM (m ² /ha)	IMA (m ² /ha.año)
500	-0,29808	0,18617	1,06795	45,18	22,50 ($\sigma = 3,8$)

El contenido de COS, CB y CT para cada edad y textura resultantes de la modelización con CO₂Fix se observa en la Figura 1. La diferencia absoluta promedio entre los valores observados a campo y los modelados

en CO₂Fix fue de 12,4 Mg/ha ($\sigma = 11,8$ Mg/ha) y 16,2 Mg/ha ($\sigma = 15,5$ Mg/ha) para el COS y el CT, respectivamente.

El almacenaje de COS y CB entre 1985 y 2018 (Figura 2) registró un aumento desde 8.440,36 Gg C a 9.644,03 Gg C (+14 %) y considerando las superficies corregidas el incremento fue de 9.485,56 Gg C a 11.378,78 Gg C (+20 %).

El almacenaje derivado de las plantaciones de *E. grandis* fue de 4.279,95 Gg C en 1985 y de 9.644,03 Gg C en 2018 (+125 %) y con las superficies corregidas de 5.325,15 Gg C a 11.378,78 Gg C (+114 %).

Discusión

La consistencia en la estimación de la edad y el número de rotaciones está condicionada por la exactitud de la clasificación y, por lo tanto, una interrupción de la señal de eucalipto puede conducir a una sobrestimación de estos parámetros. La construcción de un modelo local de estimación del rendimiento podría mejorarse con un modelo diferencial por tipos de suelos. El error en las estimaciones de CT puede asumirse como aceptable, sin embargo, es necesario ajustar los parámetros de CO₂Fix para captar la variación de la trayectoria de almacenaje de COS.

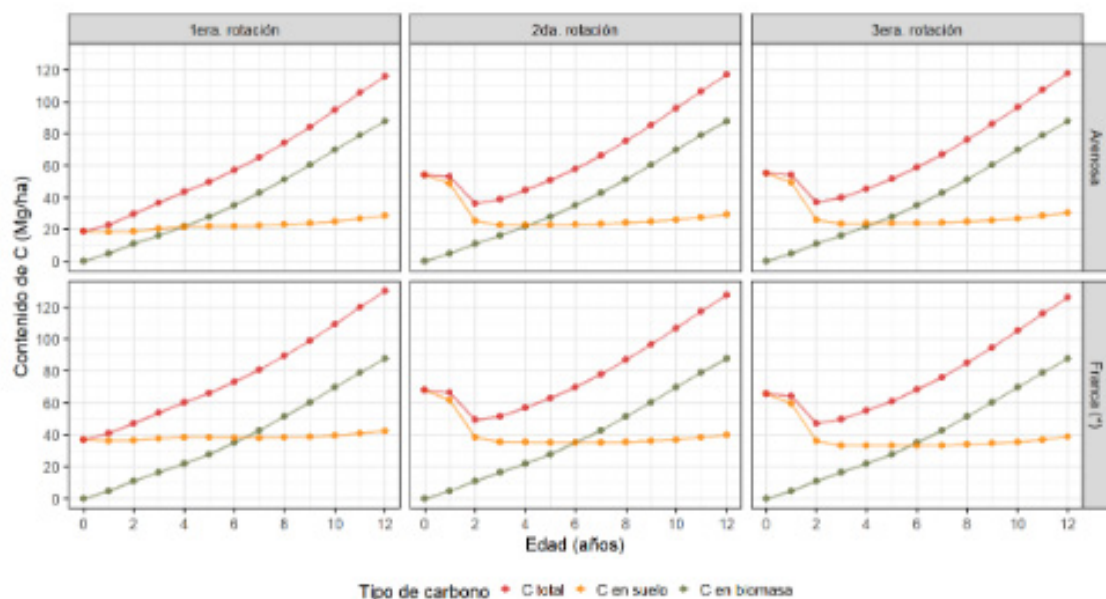


Figura 1. Contenido de C en suelo y biomasa modelizado en CO₂Fix (Mg C/ha).

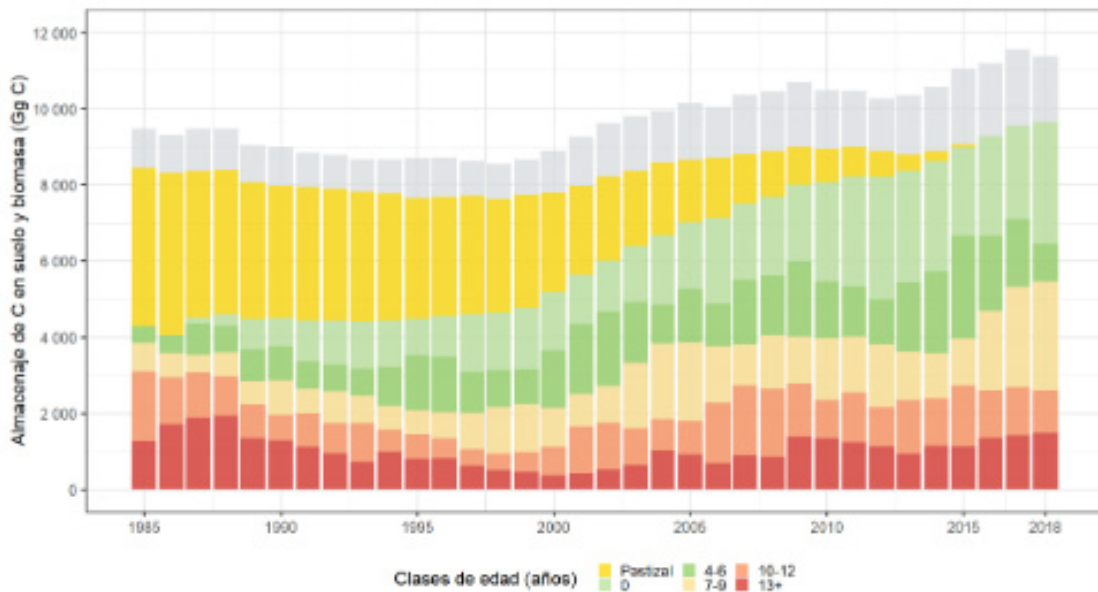


Figura 2. Almacenaje de C en suelo y biomasa en pastizales y plantaciones de *E. grandis* (Gg C) por clases de edad.

Conclusiones

La metodología propuesta es consistente para la estimación de COS y CB de plantaciones de *E. grandis* y podría ser replicada en otras áreas forestales de Argentina a partir de parámetros de entrada asequibles. Adicionalmente, estos esfuerzos pueden contribuir a producir medidas estandarizadas de almacenajes y flujos de C. Este aspecto es particularmente relevante en el marco de los compromisos internacionales asumidos por nuestro país en cuanto a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y en la evaluación de la eficiencia de las medidas implementadas.

Bibliografía citada

Breiman, L (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45, 5-32.

Gorelick, N, Hancher, M, Dixon, M, Ilyushchenko, S, Thau, D y Moore, R (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18-27.

Goya JF, Frangi, JL, Dalla Tea, F, Marcó, MA y Larocca, F (1997). Biomasa, productividad y contenido de nutrientes en plantaciones de *Eucalyptus grandis* en el NE de la provincia de Entre Ríos. XII Jornadas Forestales de Entre Ríos.

Goya, JF, Frangi, JL, Pérez, C y Dalla Tea, F (2008). Decomposition and nutrient release from leaf litter in *Eucalyptus grandis* plantations on three different soils in Entre Ríos, Argentina. *Bosque (Valdivia)*, 29(3), 217-226.

Pérez Pérez, S, Jandl, R y Rubio Sánchez, A (2007).

Modelización del secuestro de C en sistemas forestales: efecto de la elección de especie. *Ecología*, 21, 341-352.

Pérez, C, Frangi, J, Goya, J, Luy, A y Arturi, M (2013). Contenido de nutrientes en las raíces finas y el mantillo de rodales de *Eucalyptus grandis* de diferente edad en la Mesopotamia Argentina. *Bosque (Valdivia)*, 34(3), 303-310.

Ramos, S, De Ruyver, R, Gattinoni, N, Garin, R y Garran, S (2018). Estación agrometeorológica del INTA Concordia. 50 años de servicio a la comunidad. Serie Extensión Nro. 16. INTA Ediciones. Colección Institucional.

Richards, FJ (1959). A Flexible Growth Function for Empirical Use. *Journal of Experimental Botany*, 10(2), 290-301.

Sandoval, M (2022). Análisis espacial y temporal del efecto de las plantaciones de *Eucalyptus grandis* en el carbono del suelo y de la biomasa en Entre Ríos y SE de Corrientes, Argentina. [Tesis doctoral Universidad Nacional de La Plata].

Schelhaas, MJ, van Esch, PW, Groen, TA, et al. (2004). CO₂FIX V 3.1 – A modelling framework for quantifying carbon sequestration in forest ecosystems. Wageningen, Alterra, Alterrarapport 1068.