



ESTIMACIÓN DEL COSTO DE ABATIMIENTO DE CAPTURA DE CARBONO A PARTIR DEL MANEJO SILVÍCOLA INTENSIVO EN BOSQUE NATIVO DEGRADADO DEL CENTRO DE ARGENTINA

Marco UTELLO¹, Diego TELLO², Juan TARICO¹, José PLEVICH¹

RESUMEN

En la actualidad, el cambio climático constituye una de las principales problemáticas a nivel mundial y los bosques cumplen un rol determinante en la mitigación por su aporte como sumidero de carbono. En la región central de Argentina se encuentra una importante formación boscosa denominada “Caldenal”, y la ocurrencia de incendios es uno de los principales factores de degradación que afecta su estructura y diversidad. El objetivo de este trabajo fue estimar el costo económico de la reducción de emisiones basado en el costo marginal de abatimiento de cuatro tecnologías de intervenciones silvícolas desarrolladas experimentalmente en la región aplicadas a bosque nativo degradado. Se hallaron costos entre 29 ± 3 y 105 ± 3 USD por Mg CO₂eq, siendo la alternativa “Rolado + Raleo manual” la de menor costo de abatimiento. La aplicación de curvas de abatimiento proporciona información útil para la implementación de estrategias de política pública orientada a la mitigación del cambio climático.

Palabras clave: *cambio climático, secuestro de carbono, precios de carbono.*

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el cambio climático constituye y es percibido como una de las principales problemáticas socio ambientales a nivel mundial. Este fenómeno antropogénico es provocado por el exceso de emisiones de gases de efecto invernadero generando un aumento en la temperatura media mundial (IPCC, 2021). Por su parte, los bosques cumplen un rol determinante en la mitigación del cambio climático de fuente antropogénica. La mitigación del cambio climático basada en los bosques puede desarrollarse mediante la conservación y mejora del bosque como sumidero de carbono y mediante la reducción de las emisiones GEI, evitando la deforestación. Suponiendo la implementación completa del Acuerdo de París en cuanto a bosques, podrían cambiar globalmente de ser una fuente antropogénica neta durante 1990-2010 ($1,3 \pm 1,1$ Gt CO₂eq año⁻¹) a un sumidero neto de carbono para 2030 (hasta $-1,1 \pm 0,5$ Gt CO₂eq año⁻¹) y proporcionar una cuarta parte de las reducciones de emisiones planificadas por los países (Grassi et al., 2017).

Las curvas de costo de abatimiento de gases de efecto invernadero proporcionan una base cuantitativa esencial para discutir cuáles acciones serían más efectivas para reducir las emisiones y cuál sería su costo. El costo de abatimiento se define como los costos adicionales (o beneficios percibidos) de reemplazar una tecnología de referencia (desarrollo común de negocios) por una alternativa de bajas emisiones (Naucér y Enkvist, 2009). Para el sector forestal a nivel mundial, se estima que convertir los bosques en sumideros netos de carbono para 2030 tiene un costo de abatimiento promedio de 42 USD por Mg CO₂eq (Naucér y Enkvist, 2009).

En la región central de Argentina se encuentra una importante formación boscosa denominada “Caldenal”. La superficie forestal actual, según el último inventario forestal nacional (MAyDS 2020), es de 3.068.089 ha. Esta formación forestal de tipo sabana se caracteriza por una amplia gama de fisonomías, lo que se refleja principalmente en la variación de la cobertura y densidad arbórea. Su estructura y funcionalidad se está viendo afectada por la invasión de leñosas, principalmente arbustos y renuevos, un fenómeno frecuente en sistemas áridos y semiáridos (Estelrich y Suárez, 2020) que,

¹ Dasonomía. Universidad Nacional de Río Cuarto, Río Cuarto, Argentina. mutello@ayv.unrc.edu.ar

² Docente e investigador FCE UNRC-CONICET dtello@fce.unrc.edu.ar



sobre todo, afecta el hábitat como pastizales. Dicha situación condujo a que 1,3 millones de hectáreas se encuentren en estado de alta regeneración con individuos pequeños de nulo valor forestal y con alta probabilidad de incendios (MAyDS, 2020).

Estas áreas, cubiertas por sistemas muy lignificados, no solo son improproductivas desde el punto de vista forestal y silvopastoril, sino que contribuyen a un potencial peligro frente a incendios por el gran contenido de combustible de alto poder calórico. En este sentido, las intervenciones silvícolas son una herramienta de manejo de la biomasa forestal que permite bajar la carga de combustible y posibilita incrementar el crecimiento diametral y de copa de los individuos remanentes con el objetivo de convertir los renovales en árboles maduros (Estelrich y Suárez, 2020).

Al presente se encuentra escasa información en cuanto a las curvas de costo de abatimiento de CO₂e_q en ecosistemas forestales de la región y nula información para los bosques de *Neltuma caldenia* Burkart. Por consiguiente, el objetivo del trabajo fue estimar el costo de la reducción de emisiones basado en el costo marginal de abatimiento de cuatro tecnologías de intervenciones silvícolas desarrolladas experimentalmente en la región y aplicadas a bosque nativo degradado.

MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología de trabajo consistió en la proyección del crecimiento a partir de la estructura diamétrica de un bosque tipo de caldén en alta regeneración (fachinal). Según la metodología del Inventario Nacional Forestal (MAyDS, 2020) la estructura "fachinal" corresponde a un patrón de regeneración post-incendio con un DAP menor a 10 cm. Las ecuaciones empleadas en esta simulación fueron retomadas de ajustes previos (Bogino y Villalba 2008; Utello et al., 2019; Utello et al., 2023) en bosques localizados al suroeste de la provincia de Córdoba a 30 km al oeste de la localidad de Villa Huidobro. Los costos de las alternativas de intervenciones silvícolas fueron obtenidos del trabajo de Estelrich y Suárez (2020) calculados a partir de pruebas en campos experimentales.

La modelación del crecimiento forestal se realizó a través de un modelo de clases diamétricas (Silva, 1989), donde la fracción de árboles que se mueve anualmente a lo largo de todo el intervalo de clases debido al crecimiento diametral puede ser estimada por un índice de crecimiento (IC), Ecuación 1:

$$IC = Ic * P/a \quad [1]$$

Donde *IC*: Índice de crecimiento; *Ic*: Incremento corriente en diámetro de la clase; *P*: Número de años del período considerado; *a*: Amplitud de la clase de diámetro.

Para el cálculo del IC se emplearon los datos obtenidos en el trabajo de Bogino y Villalba (2008), donde se establecen el crecimiento radial y tiempos de rotación de *N. caldenia* en el centro de la Argentina. Para este trabajo se tomaron los datos del sitio de estudio "El Liebral" que se encuentra a unos 60 km de distancia de las parcelas de muestreo, dentro del área de estudio. Otro punto importante para el modelado fue el ingreso o reclutamiento que se introducirían a la primera clase diamétrica. Para tal fin se recurrió a la Ecuación 2 que predice el patrón de regeneración de *N. caldenia* bajo distintas densidades arbóreas (Utello et al., 2023):

$$n = 2206,46 * \exp^{-1,09*AB} + 630,81 * \exp^{-0,1*AB} \quad [2]$$

Donde *n*: individuos en regeneración por ha; *AB*: área basal (m² ha⁻¹).

Conociendo las existencias medias anuales en número de individuos por clase diamétrica a partir de la Ecuación 2 y el IC es posible calcular el número de años necesarios para que todos los pies de una clase pasen a la siguiente y proyectar la distribución diamétrica. Para la estimación de biomasa y su distribución por clase se aplicó la función alométrica desarrollada por Risio et al. (2013) [Ecuación 3]:

$$W = (\beta * AB^2) + \lambda * h \quad [3]$$

Donde *W*: peso de biomasa seca (kg) de las distintas fracciones del árbol; *AB*: área basal (cm² ha⁻¹); *h*: altura del árbol (m); β y λ , parámetros estimados del modelo (β : 0,000366 y λ : 7,558194).

La altura se estimó mediante la Ecuación 4 ajustada para la región de estudio (Utello et al., 2019):



$$h = \frac{10,94}{1+1,73 \times e^{-3,69 \times DAP}} \quad [4]$$

Donde h: altura total del árbol (m); DAP: diámetro a la altura de pecho (m).

Las alternativas de intervención silvícolas simuladas fueron: 1) Rolado (Kunst et al., 2008) + Raleo Manual (Estelrich y Suárez, 2020); 2) Triturado + Raleo Manual (Estelrich y Suárez, 2020); 3) Topadora (Kunst et al., 2008) + Raleo Manual (Estelrich y Suárez, 2020); y 4) Tendencial (sin manejo). El número de intervenciones fue definido por el tiempo de tránsito por la clase diamétrica, que a su vez está determinada por el IC (Ecuación 1). Cuando los individuos alcanzaban la clase diamétrica superior se simularon raleos con una intensidad del 50 % para reducir el número de pies y sostener el supuesto de maximizar el crecimiento de los árboles remanentes.

Para la situación tendencial se consideró el intervalo medio entre fuegos, que es el número promedio de años entre fechas de fuego en una cronología compuesta y ha sido ampliamente usado para describir frecuencias de fuego. Para el área de estudio, desde el primer fuego registrado en 1795 hasta el último en 1989, fue de 3,96 años (con intervalos mínimo y máximo entre fuegos de 1 y 17 años respectivamente) (Medina, 2007). Por consiguiente, el supuesto fue que a los 17 años se produciría un incendio de alta intensidad que reiniciaría el repoblado por rebrotes multicaules. En las situaciones con manejo, el supuesto fue que la ocurrencia de incendios no consume el vuelo forestal, ya que las intervenciones silvícolas generan una discontinuidad horizontal evitando la propagación del fuego de copas. Este supuesto surge de las experiencias en el uso del fuego mediante quemas prescriptas en bosques manejados con ganadería integrada en la provincia de La Pampa (Estelrich y Suárez, 2020).

Los coeficientes técnicos fueron obtenidos de intervenciones experimentales a campo en la provincia de La Pampa valorados en litros de gasoil por hectárea (Estelrich y Suárez, 2020) que permite actualizar los costos a valor presente. Para el cálculo de la Determinación del costo marginal de abatimiento (CMA) se utilizó la Ecuación 5 (Nauclér y Enkvist, 2009):

$$CMA = \frac{VAC_{opción} - VAC_{BAU}}{Emisiones_{opción} - Emisiones_{BAU}} * \$USD \text{ Mg } CO_2eq \quad [5]$$

Donde $VAC_{opción}$ = Valor actual de costo de la opción que considera algún tipo de intervención; VAC_{BAU} = Valor actual de costo de la opción sin intervención (*BAU: Business as usual*).

2. RESULTADOS

Los resultados de la simulación muestran que el potencial de secuestro de C (Figura 1) en cada alternativa de manejo, descontando el valor tendencial, fue de 19,6 y 19,8 Mg C ha⁻¹ durante el periodo simulado, lo que significa una tasa de captura de 0,39 y 0,4 Mg C ha⁻¹ año⁻¹ para Rolado/Triturado + Raleo Manual y Topadora + Raleo Manual, respectivamente, lo que significaría en multiplicar por tres el actual stock de carbono en estos ecosistemas.

Al incorporar los costos de cada tratamiento a los valores de captura estimados, se encontró que la intervención “Rolado + Raleo manual” tiene un costo de abatimiento de 29 ± 3 USD por Mg CO₂eq; la intervención “Trituradora (clareo) + Raleo Manual” tiene un costo de 51 ± 3 USD por Mg CO₂eq; y la intervención “Topadora (clareo) + Raleo Manual” tiene un costo de 105 ± 3 USD por Mg CO₂eq. En este sentido, “Rolado + Raleo manual” constituye la alternativa más costo-efectiva. Considerando toda la extensión de los bosques, esta mejora tiene un potencial de captura de 25,61 Tg CO₂eq ha⁻¹ año⁻¹ y de 0,51 Tg CO₂eq año⁻¹, aunque requeriría una inversión de 38,7 millones de USD.

Cuadro 1. Resumen de los valores proyectados a 50 años de biomasa y carbono (C) para las alternativas consideradas y la situación tendencial.

Alternativas	Biomasa (Mg ha ⁻¹)	C (Mg ha ⁻¹)	Incremento (Mg ha ⁻¹)	Tasa anual (Mg ha ⁻¹)
Rolado/Triturado + Raleo Manual	61,40	29,47	19,60	0,39
Topadora+ Raleo Manual	61,82	29,67	19,80	0,40
Tendencial	20,57	9,87	0	0

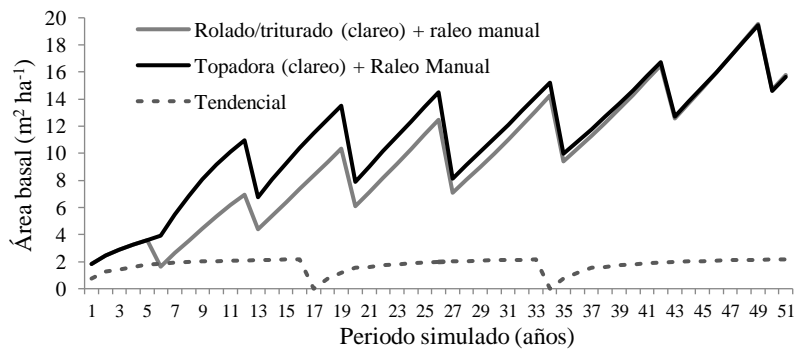


Figura 1. Evolución del área basal durante el periodo simulado para las distintas condiciones de manejo silvícolas y la situación tendencial sin manejo.

3. DISCUSION

Los valores de biomasa leñosa aérea en las situaciones de manejo proyectadas (Cuadro 1) se encuentran dentro del rango de 52,13 y 111,82 Mg MS (Materia Seca) ha⁻¹ reportados por Ledesma et al. (2021) en bosques de *Neltuma affinis* en el extremo norte de la región de estudio. Para Argentina, dada su amplia variabilidad ecológica, se han estimado valores de biomasa aérea de las tierras forestales de las distintas ecorregiones que van desde 98,80 Mg MS ha⁻¹ en el Parque Chaqueño (UMSEF, 2007), pasando por 172,87 y 266,24 Mg MS ha⁻¹ para la Selva Tucumano-Boliviana y la Selva Misionera respectivamente (SAyDS, 2007).

En el presente estudio, se estimó un incremento del 299 % en el almacenamiento promedio de carbono pasando de 9,87 a 29,57 Mg C ha⁻¹ de la situación tendencial a la manejada, respectivamente. Las estimaciones que integran el Informe PNUD (2017) determinaron stock de C de 59,2 Mg ha⁻¹ en el Parque Chaqueño. Por su parte, las estimaciones realizadas por Bonino (2006) determinaron valores de 30,31 Mg C ha⁻¹ en los bosques primarios de esa región. En un rango similar se encuentran los reportes para los bosques del Chaco Seco (Conti et al., 2014). Estos autores calcularon un stock de 22,13 Mg C ha⁻¹ en el estrato arbóreo de bosques primarios y de 18,75 Mg C ha⁻¹ en bosques secundarios de la región árida de la Provincia de Córdoba.

En Argentina son escasos los estudios que abordan la cuantificación de la tasa anual de captura de C por parte de una comunidad arbórea nativa. En esta experiencia se alcanzó un secuestro máximo simulado de 0,4 Mg C ha⁻¹ año⁻¹ en la biomasa arbórea total en la condición de 20 m² ha⁻¹ de AB. En el área de bosques xerófilos de la Provincia Chaqueña se ha utilizado un valor de captura de 0,5 Mg C ha⁻¹ año⁻¹ (Conti et al., 2014). En bosques de *N. affinis* de estructura similar a los caldenales, Ledesma et al. (2021) hallaron tasas anuales de captura de entre 0,53 y 0,95 Mg C ha⁻¹ año⁻¹, con un promedio de 0,75 ± 0,17 Mg C ha⁻¹ año⁻¹.

Considerando la alternativa "Rolado + Raleo manual", encontramos que su costo es menor que el promedio mundial actual de 42 USD por Mg CO₂eq para el sector forestal. Adicionalmente, es comparable a los reportados por otros investigadores en bosques nativos con manejos similares. Un trabajo destacado en este ámbito es el de Assmuth et al. (2021), quienes realizaron un estudio económico del almacenamiento óptimo de carbono en bosques nativos noruegos estructurados por edades desiguales y de especies mixtas (abeto, abedul y otras especies de árboles de hoja ancha sin valor comercial) utilizando una silvicultura de cobertura continua. Los resultados de su estudio muestran que los costos marginales de almacenamiento de carbono oscilan entre 3 y 40 USD por t CO₂eq, similares a los 29 USD por Mg CO₂eq encontrados en nuestro trabajo. Estos hallazgos son coherentes con los resultados de nuestro estudio, reforzando la comparabilidad y relevancia de las prácticas de manejo intensivo en la mitigación del cambio climático. Además, proyectaron que los precios del carbono para 2035 y 2055 se incrementarían entre 7 y 184 USD y entre 8 y 333 USD por t CO₂eq, respectivamente.



4. CONCLUSIONES

Los resultados de esta simulación subrayan la importancia de invertir en la recuperación de bosques degradados como una estrategia efectiva para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Adicionalmente se encontró que los costos de abatimiento en la recuperación de bosques degradados de *N. caldenia* son comparables a los proyectados en bosques nativos con manejos similares por lo que esta estrategia de manejo constituye una opción viable y necesaria para la mitigación del cambio climático.

Finalmente, se considera que la aplicación de curvas de abatimiento proporciona información útil para la implementación de estrategias de política pública orientada a la mitigación del cambio climático. Este estudio proporciona un punto de partida y es necesario profundizar en ensayos de mediano a largo plazo sobre el terreno.

5. REFERENCIAS

- ASSMUTH, A., RĂMÖ, J., TAHVONEN, O. 2021. Almacenamiento óptimo de carbono en bosques estructurados por tamaño de especies mixtas. *Environ Resource Econ* 79, 249–275 <https://doi.org/10.1007/s10640-021-00559-9>
- BOGINO, S., VILLALBA, R. 2008. Radial growth and biological rotation age of *Prosopis caldenia* Burkart in Central Argentina. *Journal of Arid Environments* 72:16-23.
- BONINO, E.E. 2006. Changes in carbon pools associated with a land-use gradient in the dry Chaco, Argentina. *For. Ecol. Manage.* 223, 183-189.
- CONTI, G., PÉREZ-HARGUINDEGUY, N., QUÈTIER, F., GORNÉ, L.D., JAUREGUIBERRY, P. 2014. Large changes in carbon storage under different land-use regimes in subtropical seasonally dry forests of southern South America. *Agriculture, ecosystems & environment* 197, 68-7
- ESTELRICH, H.D., SUÁREZ, C.E. 2020. EL bosque de Caldén: un abordaje multidisciplinario para su manejo y conservación. Ed. Santa Rosa: Editorial Universidad Nacional de La Pampa. 280 p.
- GRASSI, G., HOUSE, J., DENTENER, F. et al. 2017. El papel clave de los bosques en el cumplimiento de los objetivos climáticos requiere de ciencia para una mitigación creíble. *Cambio climático de la naturaleza* 7, 220–226.
- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático) (2021) Contribución del Grupo de Trabajo. Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. 40p.
- KUNST, C., LEDESMA, R., NAVALL, M. 2008. RBI. Rolado Selectivo De Baja Intensidad. Ediciones INTA.
- MAYDS (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de la Nación) (2020) Segundo Inventario Nacional de Bosques Nativos: informe Espinal y Delta e Islas del río Paraná: primera revisión. Buenos Aires: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de la Nación. 144p.
- MEDINA, A.A. 2007. Reconstrucción de los regímenes de fuego en un bosque de *Prosopis caldenia*, provincia de La Pampa, Argentina *BOSQUE* 28(3): 234-240
- NAUCLÉR, T., Y ENKVIST, P. A. 2009. Pathways to a Low-Carbon Economy: Version 2 of the Global Greenhouse Gas Abatement Cost Curve. McKinsey & Company.
- PNUD Argentina. Los Bosques Nativos de Argentina en el marco del proceso de Reducción de Emisiones derivadas de la Deforestación y la Degradación.
- RISIO, L., HERRERO, C., BOGINO, S.M., BRAVO, F. 2013. Estimación de biomasa aérea y subterránea en bosques nativos de *Prosopis caldenia* en la pampa semiárida Argentina. VI Congreso Forestal Español.
- SAYDS (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación Argentina), 2007. Primer inventario nacional de bosques nativos: informe regional espinal, segunda parte. 1ª ed Buenos Aires. 154p.
- SILVA, J. N. M. 1989. "The behaviour of the tropical rain forest of the brasilian amazon after logging". Green College, Oxford, Oxford Forestry Institute. Department of Plant Sciences. University of Oxford. (Tesis Ph. D.) 119 p.
- UMSEF (Unidad de Manejo del Sistema de Evaluación Forestal). Monitoreo de la superficie de bosque nativo de Argentina. Dirección de Bosques. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable. <https://www.argentina.gob.ar/ambiente/bosques/umsef>
- UTELLO M.J., PLEVICH J.O., TARICO J.C. 2023. Patrón de regeneración de renovales de *Neltuma caldenia* en el centro de Argentina: cambios de acuerdo a la cobertura arbórea y la intensidad lumínica en el sotobosque. XIX Jornadas Técnicas, Forestales y Ambientales. Iguazú, Misiones, Argentina.