

Captura y fijación de carbono como servicio ambiental de los bosques nativos del Espinal

Sione, S.M.^{1,2}; Ledesma, S.G.¹; Wilson, M.G.³; Rosenberger, L.J.¹; Oszust, J.D.¹; M.C. Sasal³; Cattaneo Hildt, A.M.¹

Autores: ¹ Facultad de Ciencias Agropecuarias - Universidad Nacional de Entre Ríos. Ruta 11 km 10,5. 3101 - Oro Verde, Entre Ríos. ² CICYTTP - CONICET. España 149. 3105 - Diamante, Entre Ríos. ³ Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. EEA Paraná. Ruta 11 km 12,5. 3101 - Oro Verde, Entre Ríos

Contacto: silvana.sione@uner.edu.ar

ARK: <https://id.caicyt.gov.ar/ark:/s22504559/69vwks2kr>

Resumen

El objetivo fue estimar la captura y almacenamiento de carbono (C) en los bosques nativos de la Cuenca del Arroyo Feliciano (Entre Ríos), como servicio ambiental ante escenarios de cambio climático y cambios de uso de la tierra. Se estimó el C almacenado en la biomasa arbórea y en el suelo (00-30 cm). A partir del análisis dendrocronológico se determinó la edad de los individuos de *Neltuma nigra* (algarrobo negro) y los incrementos anuales de área basal, biomasa y tasa de acumulación anual de C. Los bosques evaluados almacenan, en promedio, 102,4 Mg ha⁻¹. La reserva de carbono orgánico del suelo (COS) es la mayor reserva de carbono en estos bosques, representando más del 70% del total, resultando clave prestar más atención a esta reserva en las políticas de mitigación del cambio climático. La tasa de captura anual de C varió según la edad de los individuos, resultando baja a edades tempranas, seguidas de tasas crecientes en edades más avanzadas. La acumulación anual promedio de C en *N. nigra* resultó de 2,92 kg C ind⁻¹ a lo largo de su vida. La información generada aporta a la valoración del servicio que proveen los bosques del Espinal en la captura y fijación de dióxido de carbono (CO₂) atmosférico.

Palabras clave: reservas de carbono - servicio ambiental - tasa de captura de carbono - bosques nativos - Entre Ríos

Objetivos propuestos y cumplidos

General

Estimar la captura y almacenamiento de carbono en los bosques nativos de la Cuenca del Arroyo Feliciano (Entre Ríos), como servicio ambiental ante escenarios de cambio climático y cambios de uso de la tierra.

Específicos

- Estimar el C almacenado en la biomasa arbórea de bosques nativos de diferentes fisonomías y composición florística.
- Cuantificar el C almacenado en el compartimento suelo de los bosques nativos.
- Determinar la edad de individuos de las especies arbóreas dominantes (*Neltuma affinis*, *Vachellia caven* y *Neltuma nigra*) mediante análisis dendrocronológico.
- Estimar la tasa de captura anual de CO₂ en individuos de distintas especies (especies dominantes) y clases diamétricas.
- Estimar la tasa de captura anual de CO₂ por hectárea.

Cabe destacar que, por el contexto de pandemia por COVID, los dos últimos objetivos específicos fueron cumplidos parcialmente. Se culminó el análisis de la especie *N. nigra* y, a la fecha, se están finalizando los análisis correspondientes a *N. affinis* y *V. caven*.

Marco Teórico

Los bosques nativos y sus servicios ambientales

En el contexto de los cambios registrados en las tendencias climáticas y considerando los previstos con relación al calentamiento global durante el siglo XXI, existe preocupación sobre sus efectos potenciales en los ecosistemas boscosos a nivel global (IPCC 2007). El cambio climático (CC) puede tener características regionales específicas. La precipitación media anual ha aumentado en casi todo el territorio argentino, principalmente en las regiones noreste y centro. En la región Mesopotamia Sur hay fuertes tendencias a aumentos en las temperaturas promedio con un aumento de casi 0.5 ° C por década en los últimos 40 años. Sin embargo, la variabilidad de la lluvia no ha aumentado. Los años 70 y 00 fueron los más variables, mientras que la última década analizada (10 ') fue menos variable. En los últimos 80 años ha habido tendencias positivas en las precipitaciones en Mesopotamia Sur y el Chaco Árido, con aumentos de 35-50 mm por década (Karlin, comunicación personal). En las últimas décadas, la degradación y conversión de los bosques a otro tipo de coberturas destinadas a otros usos, por ejemplo, a partir de la deforestación, ha contribuido al aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (IPCC 2007). El efecto del cambio de uso de la tierra sobre la cobertura del suelo es una de las causas principales del cambio global. Actualmente el 50% de las emisiones de GEI en América Latina provienen del sector de uso

del suelo, del cual 30% se genera por deforestación de bosques. Los bosques nativos y los sistemas agroforestales juegan un papel preponderante en el ciclo global del C, regulando el intercambio gaseoso entre la biomasa vegetal y la atmósfera. Este servicio ambiental permite reducir la concentración de este elemento en la atmósfera, dado que secuestran sustanciales cantidades de C. El IPCC (2007) estima para los bosques, un potencial de mitigación de 2,7-13,8 Gt de CO₂ al año. En el año 2005 las Partes de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC) acordaron desarrollar la iniciativa “Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación de bosques” (REDD+), a fin de mitigar las emisiones de GEI generadas por los procesos de degradación y deforestación, conservar y gestionar sosteniblemente los bosques y aumentar las reservas forestales de C en los países en desarrollo. En el acuerdo sobre CC de París (COP21, 2016) se legitimó y repotenció el mecanismo REDD+, reconociendo el rol de los bosques en la lucha contra el CC. En esta Conferencia se consideró relevante el rol de la agricultura, la deforestación y los usos del suelo en las emisiones de GEI, responsables del 24% de las emisiones globales. La reducción de emisiones derivada de la deforestación y la degradación de los bosques genera grandes expectativas financieras sobre la emisión voluntaria de créditos de carbono que fortalecen las estrategias de conservación y manejo forestal sostenible (García et al., 2015). En Argentina, para alcanzar la meta de sus Contribuciones Nacionales Determinadas de no superar la emisión neta de 483 Tg CO₂e al 2030, el sector forestal cumple un rol primordial. Según el último Inventario Nacional de GEI (INGEI, 2014), la deforestación contribuye con el 14,5% de las emisiones totales del país (Programa Nacional ONU-REDD, 2019). El INTA y la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación estiman que, desde 1935, el país ha perdido cerca del 70% de sus bosques a un ritmo de 230.000 ha año⁻¹ entre 1998 y 2002, tasas que resultan mayores al promedio mundial (UMSEF, 2007). En el extenso territorio argentino, las causas, tipos y tasas de deforestación o degradación difieren según la zona ecológica. Esta situación hace necesario el desarrollo de esquemas de intervención a ser abordados por la estrategia REDD+ que tengan en cuenta las condiciones específicas de cada ecorregión. En este contexto, es necesario contar con datos sólidos, consistentes y específicos sobre la cobertura boscosa, las emisiones y absorciones forestales y las dinámicas de deforestación, los que deben ser medidos, monitoreados y reportados regularmente (Programa ONU-REDD, 2015). El proceso de pérdida y degradación de los bosques nativos de Argentina condujo al gobierno nacional a regular su uso en función de su valor de conservación, a través de la Ley N° 26331/07 de Presupuestos Mínimos de Protección Ambiental de los Bosques Nativos. Desde 2007 rige en la República Argentina la Ley 26331, que establece los Presupuestos Mínimos de Protección ambiental para el enriquecimiento, restauración, conservación, aprovechamiento y manejo sostenible de los bosques nativos, y de los servicios ambientales que éstos brindan a la sociedad. Se plantea someter a ley todos los ecosistemas forestales compuestos por especies arbóreas nativas, flora y fauna asociadas, en conjunto con el medio que los rodea, conformando una trama independiente con características propias y múltiples funciones que le otorgan al sistema un equilibrio dinámico y que brindan a la sociedad servicios ambientales.

Almacenamiento de carbono en ecosistemas de bosques

La biomasa vegetal constituye un volumen significativo en cuanto a existencias de C en muchos ecosistemas. De acuerdo con la Orientación de las Buenas Prácticas del

IPCC (2003, 2006), existen cinco compartimientos, reservorios o depósitos de carbono que pueden ser medidos en un ecosistema. Los cuatro compartimientos principales donde se almacena el carbono son: biomasa aérea (arriba del suelo), detritos o madera muerta, biomasa subterránea o sistema radical (raíces gruesas y finas) y suelos. Gran parte del total de las reservas forestales de carbono se representa en la biomasa aérea y en el suelo (Chave et al., 2003, Malhi et al., 2009, GOF-C-GOLD, 2009). La biomasa vegetal constituye un indicador de las existencias de C en los ecosistemas, y ha sido incluida por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático como variable esencial para mejorar la predicción y mitigación del CC global. Dado que gran parte de las reservas forestales de C se encuentra en la biomasa aérea de las especies leñosas, los métodos que estiman el C almacenado se centran en los cambios de existencias de la biomasa de estas especies. La cuantificación del stock de C se basa en considerar que en general un 50% de la biomasa vegetal corresponde al C fijado en ella. Estimar las reservas de biomasa de los bosques es una herramienta útil para valorar la cantidad de C que se almacena en las estructuras vivas en un momento dado (IPCC 2007). La biomasa relacionada con las plantas herbáceas anuales y perennes (es decir, no leñosa) es relativamente efímera; es decir, decae y se regenera anualmente o cada pocos años. Por lo tanto, las emisiones por descomposición se compensan con las absorciones debidas a la regeneración, lo que hace que, en general, las existencias generales netas de C sean bastante estables en el largo plazo. Es por ello que los métodos se centran en los cambios de existencias de la biomasa relacionados con las plantas y los árboles madereros, en la que se pueden acumular grandes cantidades de carbono (hasta cientos de toneladas por hectárea) durante su vida (IPCC, 2006). Asimismo, Brown (1977) indica que, en los bosques densos, la biomasa del estrato inferior representa menos del 3% de la biomasa de los árboles de más de 10 cm de diámetro. Se ha estimado que los árboles asimilan y almacenan grandes cantidades de carbono durante toda su vida (Ordóñez et al., 2001) y en el fuste de un árbol completo es donde se almacena aproximadamente 84% de biomasa (Avendaño et al., 2009), Gayoso et al. (2002) indican que, en términos porcentuales, el fuste del árbol concentra la mayor cantidad de biomasa aérea, representando entre 55 y 77% del total, seguido por las ramas con 5 a 37%; y por último las hojas y la corteza del fuste entre 1 y 15% y 4 a 16%, respectivamente.

Estimación de la Biomasa arbórea mediante Modelos alométricos

La cuantificación de la biomasa de especies leñosas constituye la base de los cálculos del stock de carbono. La biomasa aérea total de especies leñosas puede ser estimada mediante métodos directos (destructivos) o indirectos (modelos de biomasa o volumen). Los métodos directos (destructivos) se basan en el apeo y pesaje del material vegetal obteniendo resultados precisos, pero requieren complejas mediciones, alta inversión de tiempo y elevados costos (Araújo, Higuchi, De Carvalho & J.A., 1999; Gibbs et al., 2007). El método destructivo es utilizado convencionalmente para proyectos locales, dado su alta inversión de tiempo y dinero, por lo cual no es recomendado para niveles regionales o escalas nacionales (Snowdon et al. 2001). Los métodos indirectos consisten en la aplicación de modelos de biomasa obtenidos por medio de análisis de regresión entre datos de biomasa (obtenidos por el método destructivo) y las variables alométricas colectadas en el campo en inventarios forestales (diámetro basal, diámetro a la altura del pecho, altura comercial y total, crecimiento diamétrico, entre otros)

(Araújo et al., 1999; Brown 1997). Estos modelos de estimación de biomasa y/o carbono constituyen una herramienta útil para obtener estimados de la biomasa aérea total y del carbono almacenado en sistemas forestales y agroforestales (Segura & Kanninen 2005; Brown et al., 1989), a partir de variables alométricas de medición sencilla. Segura y Kanninen (2005) y Ortiz (1993), indican que los modelos son específicos para cada tipo de ecosistema, zona de vida, especie o grupo de especies. Por su parte, Andrade (2012) afirma que la aplicación de modelos alométricos podría generar sesgos en caso de no emplearse en la región específica (clima, suelos, topografía), tipo de bosques, tipo de especies y tamaño de las clases diamétricas. Es decir, el desarrollo de los modelos debe ser local. Al respecto, en el marco del proyecto PID UNER 2182, desarrollado por el grupo de trabajo que presenta este nuevo proyecto, se desarrollaron modelos alométricos para las tres especies arbóreas dominantes de los bosques nativos de Entre Ríos (Sione et al., 2019a; Sione et al., 2019b), por lo que su aplicación permitirá estimar con precisión la biomasa y C almacenado en los bosques de la región.

Análisis del crecimiento arbóreo y de la edad mediante estudios dendrocronológicos

La dendrocronología es una disciplina dotada de principios, técnicas y métodos que permiten datar los anillos de crecimiento anuales de las especies arbóreas, extraer, separar e interpretar la información acerca de los factores que han influido en su crecimiento, así como también determinar la edad de los individuos. En zonas con estacionalidad climática marcada, los árboles detienen el crecimiento durante la época desfavorable y lo vuelven a iniciar con condiciones favorables. Este patrón anual de actividad y reposo queda marcado en la estructura de la madera en forma de capas que en un corte transversal se ven como anillos (Gutiérrez, 2008). En Argentina, el primer estudio dendrocronológico se realizó en 1931 sobre una especie del género *Neltuma* -*N. caldenia*- (Burkart) característica de los bosques del Suroeste de la pampa, para identificar el clima y sus fluctuaciones en esta zona recientemente colonizada (Dussart et al., 2015). Se ha destacado el potencial dendrocronológico de esta especie, dado sus características anatómicas del leño, y su longevidad. En la década del 80 se publicaron los primeros estudios dendrocronológicos sobre *Neltuma flexuosa* D.C., estableciéndose su aptitud para estudios dendrocronológicos, con vistas a las eventuales correlaciones entre su crecimiento radial y los parámetros climáticos. Los trabajos iniciales sobre series de ancho de anillos en *N. caldenia* se realizaron con el objeto de distinguir el impacto de las fluctuaciones climáticas interanuales sobre su crecimiento radial (Dussart et al. 2015). Fritts (2001) afirma que las fluctuaciones del ancho de los anillos anuales de crecimiento están correlacionadas con las variaciones interanuales del clima. En ambientes con déficit hídrico, se suelen esperar asociaciones entre el ancho de los anillos y las precipitaciones anuales. Sin embargo, otros estudios indican funciones de respuesta más complejas, con mayor sensibilidad a las temperaturas que a las precipitaciones (Bogino y Jobbágy 2011). Por su parte, Risio et al. (2014) estudió la asociación entre el crecimiento de *N. caldenia* y el índice de aridez en San Luis y La Pampa. A la fecha no existen estudios sobre la formación de anillos en las especies nativas del Espinal.

Los bosques nativos de Entre Ríos

El área de bosques nativos de Entre Ríos pertenece a la Provincia Fitogeográfica del Espinal (Distrito del ñandubay) (Cabrera, 1976). La vegetación está caracterizada por

bosques semixerófilos dominados por *Neltuma affinis* Sprengel., *Vachellia caven* Mol. Molina y *Neltuma nigra* Griseb., acompañados por otras especies tales como *Celtis ehrenbergiana* y *Aspidosperma quebracho-blanco*. Estos bosques se caracterizan por su heterogeneidad florística y fisonómica, dado las condiciones ecológicas y la historia de uso y manejo al que han sido sometidos, siendo tradicionalmente el recurso sobre el que se sustenta la actividad ganadera de cría y recría vacuna (Ledesma et al., 2007). Los bosques en Entre Ríos se extienden en la región Centro Norte y ocupan una superficie actual aproximada de 850.000 ha y constituyen la base productiva de los establecimientos agropecuarios, siendo el uso ganadero de cría el sistema predominante. El área está sujeta a cambios de uso de la tierra básicamente por el avance de la frontera agrícola a partir de la deforestación, observándose la reducción y fragmentación de estos sistemas. En las últimas décadas, el área de bosques nativos ha experimentado un proceso de cambio de uso de la tierra a partir del reemplazo de los bosques nativos por cultivos, con tasas de deforestación próximas al 1% anual en el período 1991-2011 (Sabattini et al., 2016). En el año 2014 se sancionó la Ley Provincial 10284, que establece el ordenamiento territorial a fin de promover la conservación del bosque nativo y la regulación de cualquier cambio de uso del suelo. La valoración del servicio ambiental de los bosques nativos de Entre Ríos como secuestradores y fijadores de C atmosférico constituye un tema de relevancia, dada la importancia que revisten estos ecosistemas para la provincia. Respecto a la escala de trabajo a la que se realizará la presente investigación, diversos autores justifican la elección de la cuenca como unidad de análisis, dado que constituye un espacio geográfico delimitado por la propia naturaleza, en la que sus recursos naturales y sus habitantes poseen condiciones físicas, biológicas, económicas, sociales y culturales que le confieren características particulares (Montico, 2002; Chamochumbi, 2006). La cuenca como unidad de gestión de los recursos naturales, considerada indivisible, provee diversos bienes y servicios a la sociedad. Es visualizada como un espacio idóneo para implementar una forma de gestión ambiental de los territorios. Los planes de manejo de cuencas se consideran instrumentos para lograr la gestión del territorio, partiendo de considerarla como parte de un entorno físico con características biofísicas y socioeconómicas particulares. En Entre Ríos, la Cuenca del Arroyo Feliciano constituye un área característica y representativa del Espinal. Comprende los departamentos con mayor cobertura boscosa de la provincia (La Paz, Federal y Feliciano).

Marco Metodológico

Caracterización del área de estudio

El estudio se desarrolló en la Cuenca del Arroyo Feliciano (Entre Ríos). En esta cuenca se encuentran representadas dos regiones climáticas: una franja al norte de la cuenca que corresponde al clima subtropical húmedo de llanura y otra que cubre el resto de su territorio y corresponde al clima templado húmedo de llanura sin estación seca. Es en el sector subtropical húmedo de llanura donde la zona recibe la mayor cantidad de agua en el año, variando entre 1300 y 1400 mm. luego decrece en forma gradual de NE a SO desde los 1400 mm a 1200 mm. En general, durante el período octubre-abril se acumula la mayor parte de la precipitación anual. La temperatura media anual varía entre 18 y 20°C, y varía entre 25°C en enero y 12°C en julio.

En la cuenca del Arroyo Feliciano se han reconocido suelos correspondientes a cinco órdenes: Vertisol (30.7%), Alfisol (34 %), Molisol (21.3 %), Inceptisol (13.5 %) y Entisol (0.5 %). Los Vertisoles y Alfisoles están desarrollados sobre limos arcillosos de origen lacustre – palustre y los Molisoles sobre limos calcáreos y loess retransportados, mezclados con limos calcáreos (Plan Mapa de Suelos de la provincia de Entre Ríos, 1993). En la cuenca predominan los suelos con características vérticas: Peludertes (30.7 %), Ocracualfes vérticos (22 %), y Argiudoles vérticos (12 %). Son suelos de gran capacidad de absorción de agua, por lo que presentan mucha variación de volumen entre su estado en húmedo y seco (expansión-contracción). Los suelos del Orden Alfisol, son imperfectamente drenados y se ubican en áreas altas planas a muy suavemente onduladas, por lo que generalmente después de las lluvias quedan con exceso de agua sobre la superficie. Otro de los suelos abundantes en la cuenca son los Vertisoles que tienen un porcentaje de arcilla superior al 30 % desde la superficie, con dominio de arcillas motmorilloníticas. Se encuentran en las pendientes de la divisoria de aguas entre el arroyo Estacas y el Feliciano en el Departamento La Paz y hacia el sur de la cuenca, en las pendientes hacia el arroyo Don Gonzalo y el arroyo Estacas. Tienen limitaciones para la producción agrícola relacionadas a su drenaje deficiente, a la alta cantidad de arcilla expansiva, la baja macroporosidad, y a la baja disponibilidad de fósforo para los cultivos. Los mejores suelos para el uso agrícola son los Molisoles que se ubican en un paisaje suavemente ondulado con pendientes entre 2 % y 6 %. Tienen horizonte superficial mólico de color oscuro, bien provisto de materia orgánica (2 a 4 %) de buena calidad, 70 % o más de saturación en bases y muy buena provisión de nutrientes. Le sigue un horizonte B2 textural de menor permeabilidad. En el valle fluvial del arroyo Feliciano y sus afluentes, con un paisaje de albardones y esteros, se encuentran suelos del Orden Inceptisol que son el resultado de procesos de evolución incipientes, formados por capas de textura franco-arcillo-limosa, y con una capa freática fluctuante cerca de la superficie (Díaz et al., 2009).

Estimación de la superficie cubierta por bosques nativos, en función de los tipos fisonómicos, y de la pérdida de superficie boscosa

Se utilizó como cartografía de base el mapa del Primer Inventario Nacional de Bosques Nativos para la región del Espinal del año 2006 (SAyDS, 2007) y sus actualizaciones al año 2017 (UMSEF, 2017). A partir de esta información se generaron mapas de vegetación de la Cuenca, al año 2006 y a 2017.

Se consideraron los tipos fisonómicos correspondientes a Bosques de Ñandubay, identificados en el Primer Inventario Nacional de Bosques Nativos:

Ñandubay-Espinillo (ÑE): bosque con predominio de ñandubay (*N. affinis*) o espinillo (*V. caven*), que contribuyen siempre en más del 85 % del área basal total. En determinados sitios la palma caranday (*Trithrinax campestris*) puede conformar el sotobosque.

Ñandubay-Espinillo con otras Especies (ÑEO): bosque donde se entremezclan especies arbóreas xerófilas con otras más hidrófilas. El estrato arbóreo está constituido por ñandubay (*N. affinis*) o espinillo (*V. caven*), que contribuyen en menos del 85 % del área basal total. El bosque presenta mayor propor-

ción de especies perennifolias y mayor densidad arbórea que la clase Ñandubay-Espinillo. Además, se pueden encontrar junto a otras especies arbóreas secundarias, ejemplares o grupos aislados de yatay (*Butia yatay*) y caranday (*T. campestris*).

También se consideraron los Bosques de Ñandubay tipo Parque (ÑTP), si bien en el inventario nacional estas formaciones quedan incluidas en la categoría Otras Tierras Forestales. El criterio de incluirlos en el presente trabajo se basa en la importancia que revisten de acuerdo a la superficie que ocupan en la Cuenca. Las características de este tipo fisonómico son:

Bosques de Ñandubay Tipo Parque (ÑTP): Formación con predominio de *N. affinis* o *V. caven*, en un estrato herbáceo continuo. La distancia media entre individuos es mayor a 25 m y presenta valores medios de área basal de 2 m² ha⁻¹.

Se calculó la pérdida de superficie boscosa en la cuenca y la tasa anual de deforestación para el período 2006-2017. Adicionalmente se estimó la pérdida de bosques nativos en función de los tres tipos fisonómicos definidos en el Inventario Nacional.

La tasa de pérdida de bosques (tasa de deforestación) se estimó a partir de la ecuación propuesta por Puyravaud (2003):

$$r = \frac{1}{(t_2 - t_1)} * \ln \frac{A_2}{A_1}$$

Donde:

r: tasa anual de deforestación

t₁: año de inicio del período evaluado

t₂: año final del período evaluado

A₁: superficie de bosque al inicio del período

A₂: superficie de bosque al final del período

Estimación del C almacenado en la biomasa arbórea aérea total y en el compartimento suelo de los bosques nativos

Se evaluaron 25 sitios boscosos ubicados entre los 30°38' S - 31°30'S y 59°11'O - 59°40'O, con una distancia mínima de 2 km entre sitios. La altitud varía entre 34 y 69 msnm. El clima es templado húmedo, con una temperatura media anual de 18,3°C y una precipitación anual total del orden de los 1000 mm.

En cada sitio se delimitó una parcela circular de 1000 m², en la que se registró la especie, el diámetro basal (DB) y la altura de todos los árboles con DB ≥ 10 cm. Se estimó la densidad total (ind ha⁻¹) y relativa por especie (%) y el área basal total (m² ha⁻¹). La biomasa arbórea aérea individual se estimó a partir de modelos alométricos por especie (Sione et al. 2019; 2020a; 2020b). La biomasa se convirtió a C aplicando el valor 0,47 (Gasparri & Manghi 2004). A partir de la sumatoria de los contenidos de C por individuo se determinó la reserva de C por parcela, que luego fue extrapolada a hectárea (Mg ha⁻¹).

Se determinó el COS y la densidad aparente del suelo. En el área de la parcela de 1000 m² se tomaron muestras compuestas a dos profundidades: 0-10 cm y 10-30 cm, utilizando un barreno calador de 40 cm de longitud. El COS se determinó por el método de Walkley & Black (1934) y la densidad aparente por el método del cilindro (Forsythe 1975). La reserva de C en el suelo a cada profundidad (Mg ha⁻¹) se calculó mediante el producto entre el COS, la densidad aparente y la profundidad del suelo. Los valores obtenidos fueron sumados para calcular la reserva de C en la profundidad 0-30 cm.

Finalmente se obtuvo la reserva total de C (Mg ha⁻¹) en cada bosque, mediante la sumatoria de las reservas en biomasa y en suelo. Se aplicó un análisis de correlación de Pearson para evaluar la relación entre las reservas de C en el suelo y en la biomasa arbórea aérea. Se utilizó el software Statgraphics Centurion XVI (v. 16.1).

Determinación de la edad de los individuos de las especies arbóreas dominantes mediante análisis dendrocronológico

Cabe destacar que por el contexto de pandemia por COVID, entre otros aspectos, se retrasaron las visitas iniciales a IANIGLA (donde se realizaron los análisis dendrocronológicos), pudiendo efectivizarse la primera visita recién en marzo de 2022 (a 2 años de iniciado el proyecto). Actualmente se está finalizando el análisis de *N. affinis* y *V. caven*.

Se trabajó con las especies dominantes del bosque nativo del Espinal: *Neltuma nigra* (algarrobo negro), *V. caven* (espinillo) y *Neltuma affinis* (ñandubay). En 15 individuos de distinta clase diamétrica de cada especie, se obtuvieron secciones transversales de 5 cm de grosor aproximadamente, a la base de cada árbol (0,3 m). Se extrajeron con motosierra. Los individuos seleccionados presentaban fustes sin defectos y de buena vitalidad. Cada sección fue identificada y almacenada en un espacio cerrado al menos durante 30 días, para su secado a temperatura ambiente.

En el Instituto IANIGLA (CONICET), en el marco de una estancia profesional realizada por la Dra. Sione, bajo la supervisión del Dr. Ricardo Villalba, se realizaron los análisis dendrocronológicos, habiéndose completado a la fecha la especie *Neltuma nigra* y con un avance del 80% en *Neltuma affinis*. Cabe destacar que esta última especie muestra una elevada complejidad en la lectura de los anillos de crecimiento, por lo que aún se están realizando los últimos análisis para su determinación.

Una vez secas, las secciones transversales fueron enviadas a la carpintería de IANIGLA, para su tratamiento de pulido y lijado, previo análisis dendrocronológico. Las muestras debieron ser trabajadas en primera instancia con una garlopa, para eliminar las irregularidades propias del corte con motosierra, y así dejarlas en condiciones para proceder a su montaje en un banco de carpintería y finalizar su preparación con una lijadora de banda, respetando una secuencia de granulometrías ascendentes. En primer lugar, las secciones transversales fueron pulidas con lijas de 200 a 1000 granos y se fecharon visualmente con lupa binocular, evaluándose dos radios por sección (Fig. 4). El ancho de los anillos se midió con un dispositivo Velmex (precisión de 0.001 mm) conectado a una computadora (Fig. 4) y, en otros casos, con el Programa CooRecorder TM (Maxwell y Larsson, 2021) tras escanear las imágenes de las secciones transver-

sales. Para la asignación del año calendario a cada anillo de crecimiento, se aplicó la convención de Schulman (1956) para el hemisferio sur, que asigna a cada anillo de crecimiento el año en que empezó a crecer (primavera).

Para calcular los incrementos de diámetro anuales y acumulados se promediaron los valores de los dos radios de cada sección transversal. La calidad de la datación y la precisión de la medición de las series de anillos de árboles se evaluó con el programa COFECHA (Holmes, 1983), que comparaba la variabilidad del ancho de los anillos para asignar correctamente el año cronológico de cada anillo y determinar la existencia de anillos falsos o ausentes (Fritts, 2001). Tras la datación cruzada, las series individuales se estandarizaron con el programa ARSTAN v.48 (Cook y Krusik, 2016) utilizando una función spline dependiente de la edad (Cook, 1985).

A partir del número de anillos de crecimiento se determinó la edad de los individuos, y se evaluó la correlación con el diámetro basal (Correlación de Pearson).

Determinación de incrementos anuales de área basal y biomasa de *N. nigra* a partir del análisis dendrocronológico. Estimación de la tasa de captura anual de CO₂ en individuos de distintas especies

El ancho de anillos se obtuvo como el promedio entre los valores de ancho determinado en los dos radios (series) de cada individuo. A partir de los incrementos radiales obtenidos para cada sección transversal, se determinaron los incrementos anuales, acumulativos y medios del diámetro basal, el área basal y la biomasa seca, para el rango de edades en la cual se disponía de un mínimo de tres individuos.

Se determinó el incremento corriente anual (ICA_{ab}) y medio anual (IMA_{ab}) de área basal, utilizando las siguientes fórmulas:

$$\begin{aligned} \text{ICA}_{ab\ t} &= \pi (r_t^2 - r_{t-1}^2) \\ \text{IMA}_{ab\ t} &= \pi (r_t^2)/t \end{aligned}$$

Donde: ICA_{abt} es el incremento corriente anual en área basal para el año t; IMA_{abt} es el incremento medio anual en el año t; r_t es el radio del árbol en el año t, y r_{t-1} es el radio en el año t-1 (año previo).

El crecimiento en área basal acumulada para un determinado año se obtuvo a partir de la sumatoria de los ICA_{ab} hasta ese año.

Para estimar los incrementos en biomasa seca (y por consiguiente la acumulación de C, obtenida a partir del dato de biomasa y fracción de C), se utilizó la ecuación alométrica desarrollada para *N. nigra* en la región (Sione et al., 2020), que predice la biomasa seca individual a partir del diámetro basal. Esta ecuación se aplicó a los incrementos acumulados de diámetro para estimar los incrementos acumulados de biomasa. El incremento corriente anual en biomasa seca (ICA_b), indicador de la productividad individual de madera en un determinado año (t), se estimó a partir de la diferencia entre los valores de incrementos acumulados de biomasa en los años t y t-1.

Utilizando los valores de área basal y biomasa, se estimó la edad biológica de culminación del crecimiento o edad biológica de rotación, entendida como la edad en la que la productividad biológica es máxima, y que se alcanza cuando el IMA iguala al ICA (Assman, 1970).

Modelización del crecimiento

Con los datos de incrementos anuales de área basal y de biomasa, se ajustó el modelo de Hossfeld (Tabla 1), que simula de forma lógica y precisa el crecimiento a nivel individual o del rodal a través del tiempo (McCullagh et al., 2017. Este modelo tiene la propiedad de simular el crecimiento sigmoideal de las especies forestales maderables y reflejar la dinámica antagónica que ocurre entre los factores fisiológicos intrínsecos que estimulan el crecimiento y los del medio ambiente que lo limitan (Kiviste et al., 2002) La bondad de ajuste se evaluó mediante el coeficiente de determinación ajustado (R^2 aj.), el cuadrado medio del error (CME) y el error estándar de los parámetros estimados (EES). Una vez ajustado el modelo se desarrollaron sus respectivas expresiones para determinar ICA e IMA (Tabla 1). Para el análisis de los datos se utilizó el software Statgraphics Centurion XVI v. 16.1 (StatPoint Technologies).

Tabla 1. Modelo de Hossfeld y sus expresiones para estimar el incremento medio anual (IMA) y el incremento corriente anual (ICA). Donde: y es el crecimiento en área basal (cm^2) o en biomasa (kg); β_0 y b son parámetros del modelo.

Modelo	IMA	ICA
$y = (\text{edad}^2) / (\beta_0 + b \cdot \text{edad})^2$	$\text{IMA} = y / \text{edad}$	$\text{ICA} = (2 \beta_0 \cdot \text{edad}) / (\beta_0 + b \cdot \text{edad})^3$

Finalmente, con los datos de incremento anual de biomasa se obtuvo la acumulación anual de C por individuo (Sione et al., 2020).

Síntesis de Resultados y discusión

Clasificación de los bosques nativos por fisonomía. Superficie cubierta por bosques nativos, en función de los tipos fisonómicos, y de la pérdida de superficie boscosa

En 2006 la Cuenca presentaba una superficie boscosa de 516602 ha, que representa el 62,2% de la superficie total (Figura 1). La contribución de los tipos fisonómicos a la superficie boscosa total resultó mayor para los ÑE (50,6%), seguido por ÑEO (35,5%), correspondiendo el 13,9% restante a ÑTP (Tabla 2; Figura 1).

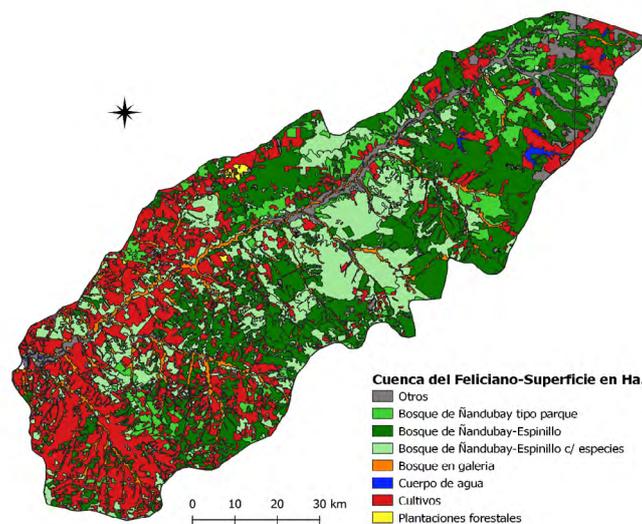


Figura 1. Cobertura de bosques nativos, por tipo fisonómico, en la Cuenca del Arroyo Feliciano, para el año 2006

Tabla 2. Superficie ocupada por los tipos fisonómicos de bosques nativos en la Cuenca.

Tipos fisonómicos de bosques	Superficie (ha)
BOSQUE DE ÑANDUBAY-ESPINILLO	261.291
BOSQUE DE ÑANDUBAY-ESPINILLO CON OTRAS ESPECIES	183.534
BOSQUE DE ÑANDUBAY TIPO PARQUE	71.777
TOTAL BOSQUES	516.602

En el período evaluado (2006 – 2017), la Cuenca experimentó una pérdida de 43802 ha de bosques nativos (8,5% de sus bosques), que pasaron a tierras de cultivos. La mayor reducción de superficie correspondió a bosques de Ñandubay-Espinillo (Tabla 3).

Tabla 3. Superficie boscosa, por tipo fisonómico, en la Cuenca y pérdida por deforestación (período 2006-2017).

TIPOS DE BOSQUE	Superficie (ha)		
	2006	2017	Deforestada
BOSQUE DE ÑANDUBAY-ESPINILLO	261.291	238.519	22.772
BOSQUE DE ÑANDUBAY-ESPINILLO CON OTRAS ESPECIES	183.534	171.476	12.058
BOSQUE DE ÑANDUBAY TIPO PARQUE	71.777	62.805	8.972
TOTAL BOSQUES	516.602	472.800	43.802

Carbono almacenado en la biomasa arbórea aérea total y en el compartimento suelo de los bosques nativos

Estructura forestal

La densidad media de árboles, el área basal total, la cubierta de copas y la dominancia relativa de las especies se presentan en la Tabla 4. Dentro de las parcelas de muestreo, el número total de tallos (≥ 10 cm de diámetro basal) inventariados por parcela fluctuó entre 130 y 590 árboles por hectárea.

En las zonas forestales evaluadas, sólo tres especies (*N. nigra*, *N. affinis* y *V. caven*) representaron el $94 \pm 8,3\%$ del área basimétrica total. Las otras especies arbóreas asociadas (*C. ehrenbergiana*, *A. quebracho-blanco*, *N. alba* y *M. cisplatensis*) tenían una dominancia relativa menor al 5%.

Tabla 4. Resumen de las variables florísticas y fisonómicas en los sitios evaluados

DT (ind ha ⁻¹)	AB (m ² ha ⁻¹)	CC (%)	<i>N. affinis</i>	DR (%) <i>N. nigra</i>	<i>V. caven</i>
341 (32,0)	11,1 (0,76)	57,0 (5,0)	27,9 (4,3)	45,2 (6,1)	21,0 (4,1)

Donde: DT representa la densidad arbórea, AB representa el área basal, CC representa cobertura de copas y DR representa la dominancia relativa de las especies arbóreas. Los valores representan los valores medios, y los errores estándares se muestran entre paréntesis.

Reservas de carbono en la biomasa arbórea y en el suelo

La reserva total de C en los bosques evaluados se estimó en $102,4 \pm 24,0$ Mg ha⁻¹. El C almacenado en los primeros 30 cm de profundidad del suelo representó el $73,1 \pm 6,6\%$ del C total por hectárea. La reserva de C de la biomasa arbórea por unidad de superfi-

cie varió ampliamente, oscilando entre un mínimo de 11,0 Mg ha⁻¹ y un máximo de 44,7 Mg ha⁻¹. La reserva de COS del suelo mostró una correlación positiva significativa ($r = 0,50$; $p < 0,05$) con el C de la biomasa arbórea (Fig. 2).

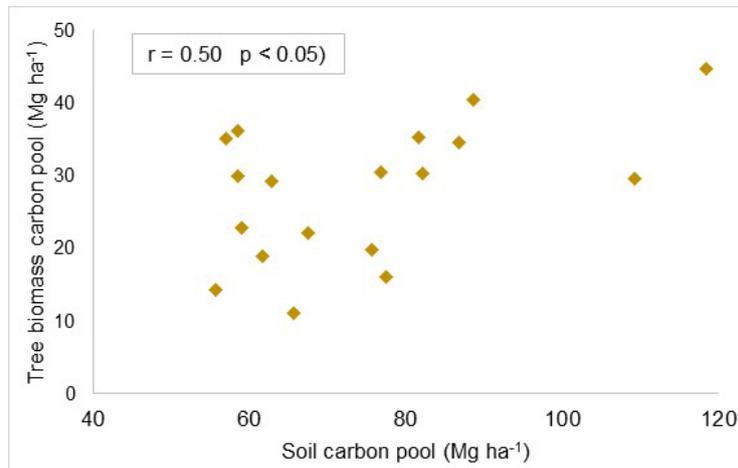


Figura 2. Relación entre las reservas de carbono en la biomasa arbórea y en el suelo

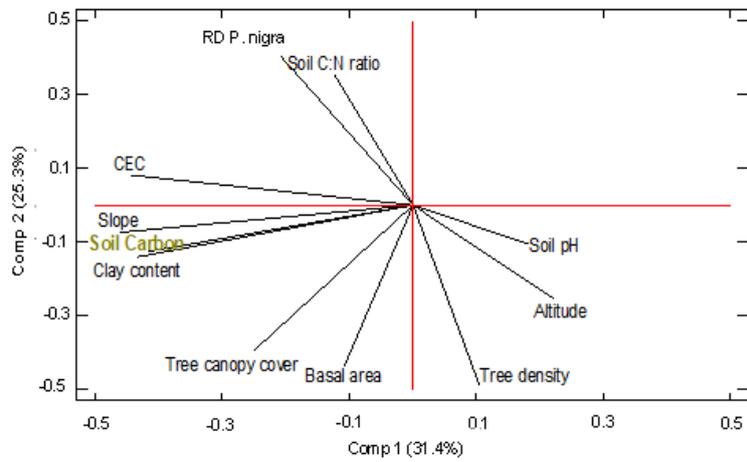
Factores determinantes de los reservorios de carbono (biomasa arbórea, suelo y reservorios totales)

El Análisis de Componentes Principales (ACP) indicó que tanto las variables de estructura forestal como los factores abióticos están asociados con las reservas de C en los diferentes compartimentos (biomasa arbórea, suelo y reservorios totales), a nivel de parcela (Fig. 3a-c). En el caso de los reservorios de C del suelo, el análisis reveló que la mayor parte de la información (56,7%) era explicada por los ejes horizontal (31,4%) y vertical (25,3%) (Fig. 3a). Para el componente 1 (eje horizontal, PC1), la pendiente (-0.46, valor de correlación PCA), CEC (-0.44), contenido de arcilla (-0.43) y la reserva de carbono del suelo (-0.41) tuvieron mayor peso. Para el componente 2 (eje vertical, PC2), la densidad de árboles (-0.49), el área basal (-0.44), la dominancia relativa de *N. nigra* (0.41) y la cobertura de copas (-0.40) tuvieron mayor peso (Fig. 3a). El PCA también puede darnos una buena información sobre la relación entre variables. Es posible observar en la Fig. 3a que existe una relación directa entre la reserva de carbono del suelo y la pendiente, la CIC y el contenido de arcilla. El pool de carbono del suelo presentó correlaciones positivas significativas ($p < 0.05$) con estas variables (Fig. 4).

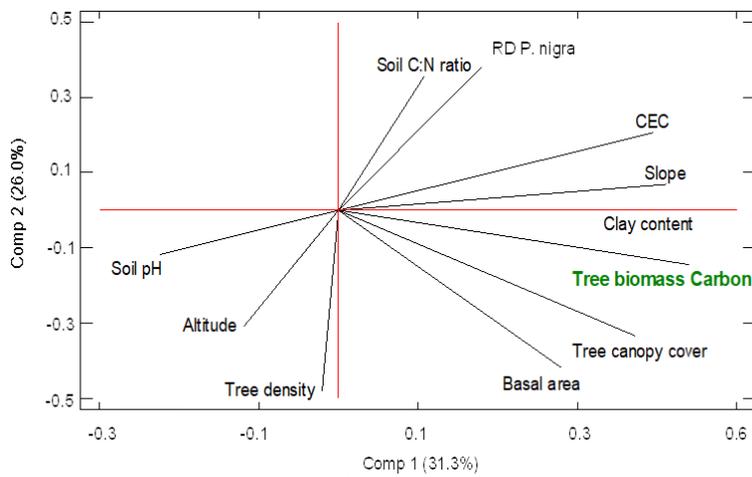
En el caso del ACP que incluye las reservas totales de carbono, las dos primeras PC contenían sistemáticamente más del 57% de la variación total de las 11 variables. El primer eje (PC1) explicaba el 32,3% de la variación. La pendiente, los parámetros edáficos (contenido de arcilla y CEC), los reservorios de carbono total y la cobertura del dosel arbóreo tuvieron mayor peso y se correlacionaron negativamente (-0.45; -0.42; -0.42; -0.44 y -0.30, respectivamente) con este eje (Fig. 3c).

El segundo eje del ACP contribuyó con un 25,6% a la variación total y se relacionó principalmente con todas las variables de estructura forestal. En la Fig. 3c es posible observar que existe una relación directa entre la reserva total de carbono y la pendiente y el contenido de arcilla. Estas dos últimas variables se correlacionaron positivamente con la reserva total de carbono ($r = 0.62$, $p < 0.05$; y $r = 0.56$, $p < 0.05$, respectivamente) (Fig. 4).

a.



b.



c.

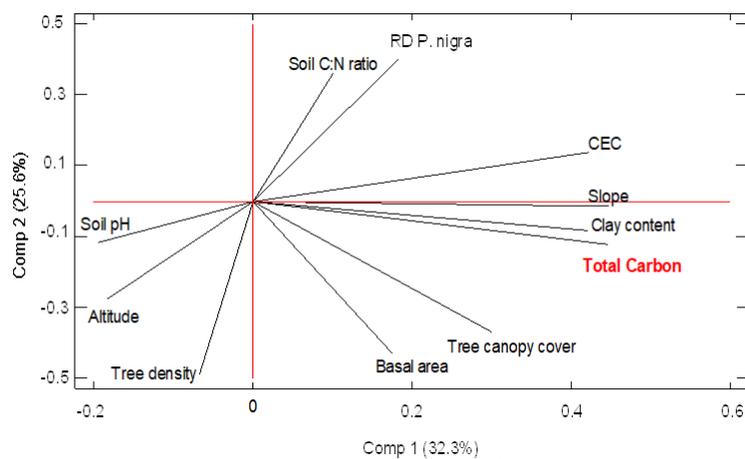


Figura 3. Análisis de Componentes Principales (ACP). (a) Múltiples factores y reserva de carbono orgánico del suelo, (b) múltiples factores y reservas de C en la biomasa arbórea, (c) múltiples factores y reserva total de C. Comp 1= Componente Principal 1; Comp 2= Componente Principal 2; CEC: capacidad de intercambio catiónica; RD N. nigra = dominancia relativa de *Neltuma nigra*.

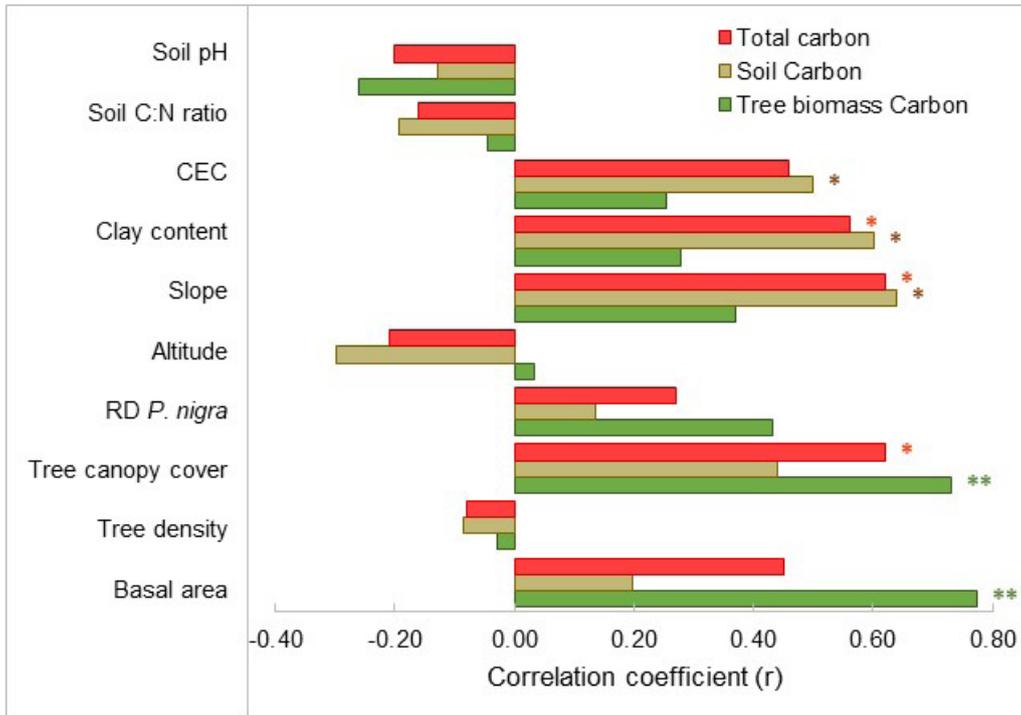


Figura 4. Coeficiente de Correlación (Pearson r) de la relación entre reservas de carbono (biomasa arbórea, CO suelo y reserva total) y diferentes factores. * y ** representan correlaciones significativas ($p < 0.05$) y altamente significativas ($p < 0.001$), respectivamente.

Se observaron grandes diferencias en las reservas de C entre los distintos tipos de suelo (Fig. 5). Los Vertisoles tuvieron la mayor reserva de COS ($86,1 \text{ Mg ha}^{-1}$). Se observó un comportamiento diferencial en la variabilidad de la reserva de COS del suelo, resultando un mayor CV en los Vertisoles (24,5%) que en los Alfisoles (16,8%). El pool de C de la biomasa arbórea en Vertisoles también resultó mayor que en Alfisoles (Fig. 5), sin embargo, estas diferencias no fueron significativas ($p > 0,05$). Los coeficientes de variación en este pool se estimaron en 39,1% y 30,8% para Vertisoles y Alfisoles, respectivamente.

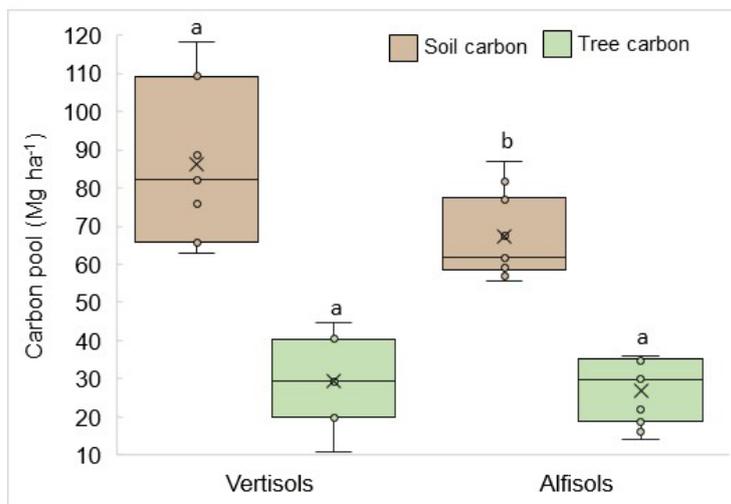


Figura 5. Reservas de carbono en la biomasa arbórea y en el suelo, en función del tipo de suelos. Letras diferentes indican diferencias significativas (LSD Fisher $p < 0,05$) entre tipos de suelo para un mismo compartimento (biomasa arbórea o suelo).

De nuestros resultados se desprende que la reserva de COS está fuertemente relacionada con la reserva de C de la biomasa arbórea, lo que concuerda con hallazgos anteriores. El suelo y la vegetación tienen interrelaciones complejas porque se desarrollan juntos durante un largo periodo de tiempo (Ahirwal et al. 2021). El almacenamiento de COS en el suelo está controlado por el equilibrio entre las entradas de carbono procedentes de la vegetación y las salidas a través de la descomposición; así, la cantidad de COS afecta y es afectada por la vegetación (Schlesinger 1977). Encontramos que los bosques evaluados contienen una reserva de C total (biomasa arbórea + suelo -primeros 30 cm de profundidad-) de $102,4 \text{ Mg ha}^{-1}$. Estas estimaciones están dentro del rango de observaciones anteriores de ecosistemas comparables considerando la biomasa aérea y los perfiles superiores del suelo (Fig. 6).

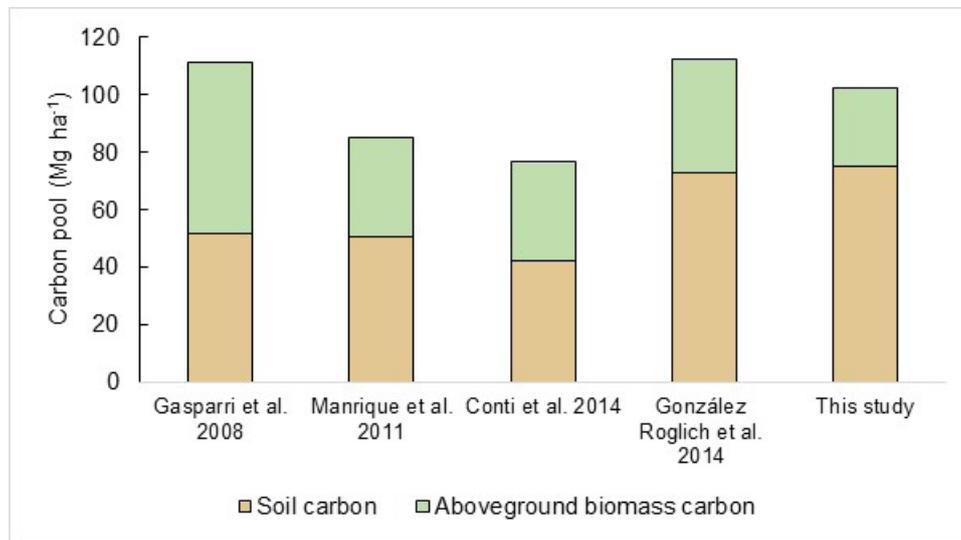


Figura 6. Comparaciones de biomasa y reservas de carbono del suelo en bosques del Espinal (noreste de Argentina) con ecosistemas comparables. Gasparri et al. (2008): bosque chaqueño estacionalmente seco; reservas de carbono calculadas incluyendo todos los compartimentos aéreos y el SOC hasta 1 m de profundidad, basado en estimaciones indirectas. Manrique et al. (2011): bosque chaqueño semiárido; reservorios calculados incluyendo biomasa aérea y SOC en 0-30 cm de profundidad. Conti et al. (2014): bosque chaqueño semiárido; reservorios calculados incluyendo todos los compartimentos aéreos (árboles, arbustos, plantas no leñosas, detritos gruesos y finos), SOC y reservorios de carbono inorgánico del suelo hasta 2 m de profundidad. González Roglich et al. (2014): bosque cercano semiárido del Espinal; cálculo incluyendo leñosas y herbáceas, sobre y bajo tierra, hojarasca y SOC hasta 2 m de profundidad.

De acuerdo a estudios previos, encontramos que el C almacenado en el suelo es la mayor reserva de carbono ($74,7 \text{ Mg ha}^{-1}$), representando el 73,1% del C total por hectárea, con más de la mitad de los sitios entre 72,1 y 85,7 % de la reserva total. En bosques comparables (Fig. 6), como el Caldenal en el Espinal semiárido, y los bosques chaqueños semiáridos, entre el 53% y el 63% del stock total de C del ecosistema se encontraba en el suelo (Bonino 2006; Gasparri et al. 2008; Manrique et al. 2011; Pan et al. 2011; Conti et al. 2014; González Roglich et al. 2014).

Estudios realizados en diferentes regiones forestales de Argentina reportaron un amplio rango del pool de C de la biomasa arbórea entre los tipos de bosques extratropicales. Por ejemplo, el bosque semixerófilo de la región del Espinal almacenó entre

38,9 y 43,9 Mg C ha⁻¹ (Sione et al. 2021 y Ledesma et al. 2021, respectivamente); los bosques semiáridos del Chaco secuestraron hasta 43 Mg ha⁻¹ (Gasparri y Manghi 2004; Conti et al. 2014; Loto 2021), mientras que se determinó un stock de C de 270,1 Mg ha⁻¹ en biomasa aérea de bosques andino-patagónicos (Gasparri y Manghi 2004). El valor medio de carbono estimado en nuestro trabajo fue de 27,8 Mg ha⁻¹, situándose la mitad de los sitios entre 20 y 35 Mg ha⁻¹. Se observó una variabilidad moderada de estos valores (34%). Los bosques restantes del área de estudio son heterogéneos en cobertura y nivel de degradación debido a varias perturbaciones antropogénicas como la tala selectiva, los incendios y la gestión no planificada del pastoreo.

El almacenamiento de C en la biomasa depende de muchos factores como el tipo, la densidad y la diversidad de esta vegetación. Se destacaron fuertes correlaciones positivas entre las existencias de C en los árboles, por un lado, y la densidad, el tamaño y la altura de los árboles, por otro (Aryal et al., 2018; Dimobe et al., 2019). De acuerdo con los estudios anteriores (Sheikh et al., 2020; Osei et al 2022), encontramos que la cubierta de copas de los árboles y el área basal demostraron ser impulsores significativos del almacenamiento de C en la biomasa, así como de las reservas totales de carbono de los bosques. En cambio, no encontramos relación entre la densidad arbórea y estos pools. El tamaño de las especies arbóreas y la cubierta del dosel explicaron más de la variación observada de las reservas de C de biomasa que la densidad de árboles (Gebeyehu et al. 2019). Burrows et al. (2000) indican que el área basal se utiliza normalmente para estimar los reservorios de C de la biomasa ya que muestra una relación significativa con este reservorio, integra tanto el número como el tamaño de los árboles y es fácilmente medible. Osei et al. (2022) descubrieron que el área basal explicaba >88,0% de la variabilidad de las reservas de carbono leñoso por encima del suelo. La importancia significativa de la cubierta de copas en la reserva de C de la biomasa podría atribuirse a la fisonomía de las especies dominantes de los bosques del Espinal. Por ejemplo, los individuos de *N.nigra* y *N.affinis* invierten la mayor parte de sus recursos en el desarrollo de la copa en lugar de los tallos (Sione et al. 2019; Sione et al. 2020a); por lo tanto, los valores altos de cobertura del dosel arbóreo se asocian con mayores reservas de C.

Nuestros resultados mostraron que la pendiente, el contenido de arcilla del suelo y la CIC son los principales factores que controlan la reserva de C del suelo, así como la reserva total de C de los bosques, aunque la correlación entre la CIC y la reserva total ($r = 0,46$) no fue significativa. La fuerte influencia del contenido de arcilla en el almacenamiento de carbono del suelo es consistente con observaciones anteriores en esta misma región (SAGyP, 2022; González Roglich et al. 2014), y refuerza hallazgos previos en diferentes ecosistemas de todo el mundo. Varios autores informaron que la textura del suelo juega un papel importante, con el aumento del contenido de arcilla disminuyendo las salidas de C a través de su efecto estabilizador y protector sobre el COS (Paul 1984; Jobbágy y Jackson 2000).

Edad de los individuos de *N. nigra* obtenida a partir del análisis dendrocronológico

Se determinó una edad media de 41,9 años (26 - 67 años) para el conjunto de individuos de *N. nigra*. El crecimiento radial medio osciló entre 0,4 y 4,86 mm año⁻¹, con un valor medio de $2,28 \pm 0,74$ mm año⁻¹. Este valor resulta inferior a los determinados en el Chaco Árido para la misma especie (3,29 mm) y para *Neltuma alba* (Griseb.) C.E. Hughes & G.P. Lewis (4,05 mm), en sitios localizados a menores latitudes (Giménez et al., 2003; 1998). El efecto de la variabilidad ambiental sobre el crecimiento de los árboles

del género y la producción leñosa fue demostrado a lo largo de un gradiente latitudinal (Villagra et al., 2005b) donde el crecimiento medio y el diámetro basal medio, entre otras variables, disminuyeron a lo largo de un gradiente norte-sur. Por su parte, en otro Distrito fitogeográfico del Espinal (Distrito del Caldén, en la región semiárida del centro-oeste argentino), el crecimiento radial medio de *Neltuma caldenia* (Burkart) C.E. Hughes & G.P. Lewis fue de 2,7-4,0 mm año⁻¹ (Bogino y Villalba, 2008), consistente con nuestros resultados.

El diámetro basal de esta especie estuvo significativamente correlacionado con la edad (Fig. 7), ajustando a una función polinómica de segundo grado (diámetro = $0,019 \cdot \text{edad}^2 - 0,99 \cdot \text{edad} + 27,05$; $r^2 = 0,63$; $P < 0,0003$), en coincidencia con Giménez et al. (2003), quienes han reportado un ajuste de este tipo para la misma especie. Para las especies arbóreas del Espinal se han sugerido valores orientativos de DMC de 25-30 cm (Coirini et al., 2013), diámetro que se alcanza aproximadamente a los 50-55 años de edad (Fig. 7). En poblaciones de *N. nigra* del Chaco Semiárido, con precipitaciones anuales 50% inferiores respecto a nuestro sitio de estudio, pero a menores latitudes, estos diámetros se alcanzan en individuos de 38-45 años de edad (Giménez et al., 2003). Para *N. caldenia*, individuos de 60 años presentaron diámetros de 11-18,5 cm en el desierto del Monte y de 32 - 47 cm en el Espinal, Distrito del Caldén (Villagra et al., 2005; Bogino y Villalba, 2008).

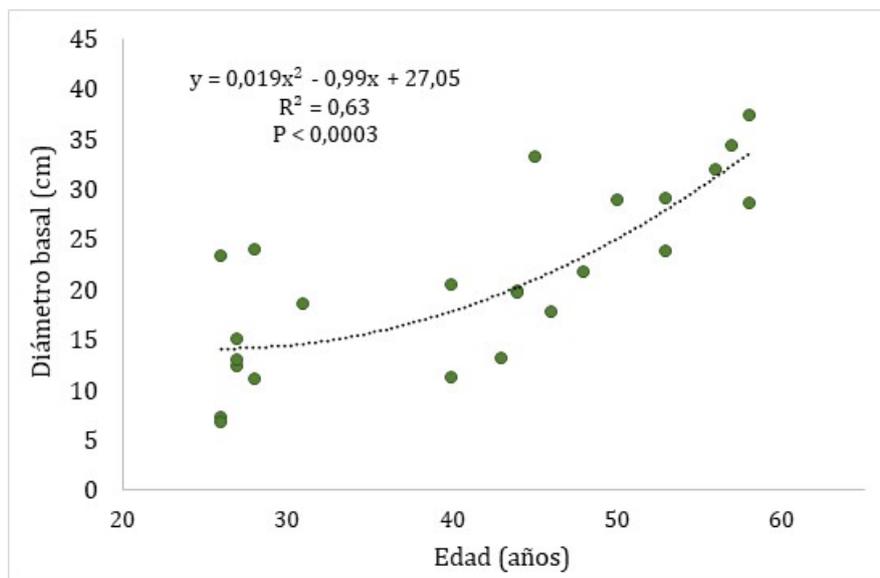
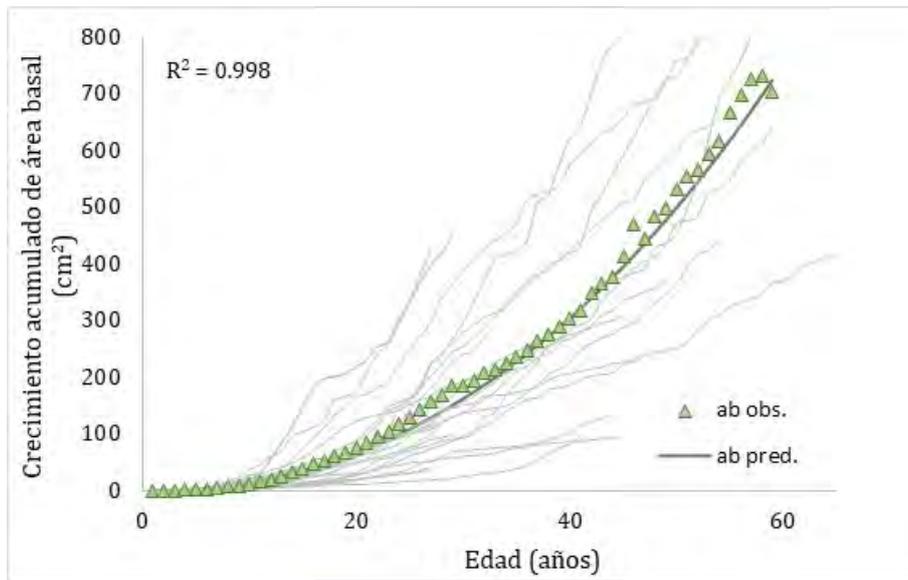


Figura 7. Relación entre el diámetro basal del fuste y la edad de individuos de *Neltuma nigra*

Incrementos anuales de área basal y biomasa de *N. nigra* a partir del análisis dendrocronológico

Las trayectorias de crecimiento acumulado del área basal en función de la edad del árbol (Fig. 8a) mostraron patrones similares a las de crecimiento acumulado de biomasa seca (Fig. 8b). En la Tabla 5 se presentan los parámetros y estimadores para los modelos obtenidos.

a.



b.

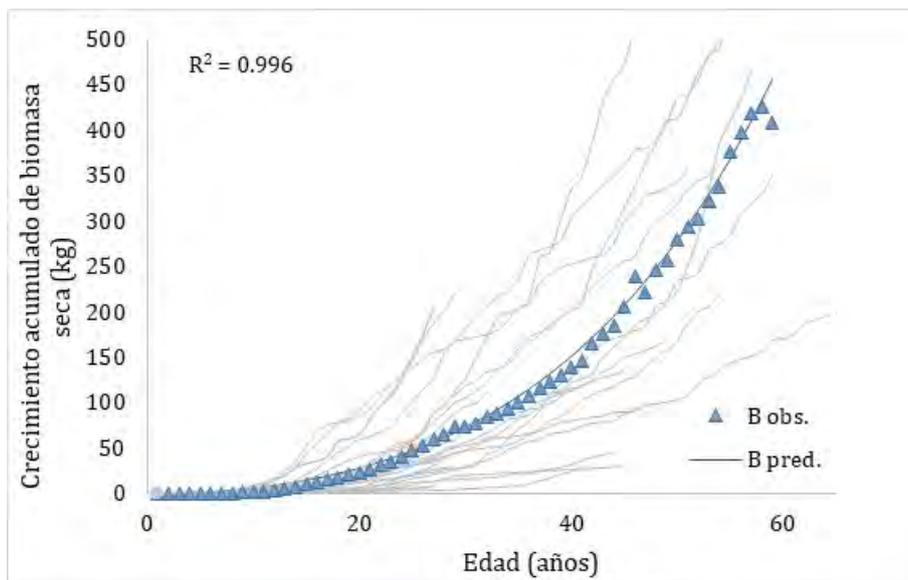


Figura 8. Modelo de Hossfeld para estimar el crecimiento acumulado en (a) área basal y (b) en biomasa seca de *Neltuma nigra*. Donde: ab obs. es área basal observada y ab pred. es el área basal predicha por el modelo (cm²); B obs. y B pred. es biomasa seca observada y predicha por el modelo (kg), respectivamente. Las líneas grises representan las trayectorias acumuladas de los valores de (a) área basal y (b) biomasa seca de 25 individuos.

Tabla 5. Parámetros y estimadores para los modelos de Hossfeld para estimación de área basal y biomasa seca

	Parámetro	Valor estimado	Error estándar (EES)
Modelo para crecimiento en área basal	β_0	2,396	0,037
	b	-0,004	0,001
Modelo para crecimiento en biomasa seca	β_0	4,340	0,075
	b	0,026	0,001

Los ICA_{ab} e ICA_B variaron en las diferentes etapas del período de crecimiento (Tabla 6; Fig. 9). Durante la fase juvenil (primeros 10 años) se registraron incrementos medios relativamente bajos, los que fueron aumentando a medida que crecían los individuos. Las bajas tasas de crecimiento en las etapas tempranas del desarrollo generalmente son atribuidas al efecto de la competencia (Dussart et al., 2011). El mayor crecimiento, tanto en área basal (ICA_{ab}) como en biomasa seca (ICA_B) se produjo después de los 50 años, con un promedio anual de $26,9 \text{ cm}^2$ y $16,7 \text{ Kg}$, respectivamente (Tabla 6). No existen estudios previos sobre el crecimiento de área basal y de biomasa de *N. nigra* en regiones húmedas de Argentina. Nuestros resultados son consistentes con los máximos incrementos de área basal determinados para *N. caldenia* (entre $21,4$ y $29,3 \text{ cm}^2$) en el centro-oeste semiárido argentino, con precipitaciones anuales del orden de los 600 mm (Bogino y Villalba, 2008). Estos autores determinaron tasas relativamente bajas de crecimiento en las fases juveniles, e incrementos anuales que se estabilizan en torno a los 70 años y disminuyen gradualmente a edades superiores a los 80 años. Para la misma especie, en la provincia de San Luis, los incrementos de área basal fueron sostenidos durante los primeros 40 años, seguidas de un período de crecimiento estable y una posterior disminución a partir de los 80 años (Bogino y Villalba, 2008). En poblaciones de *Neltuma flexuosa* (DC.) C.E. Hughes & G.P. Lewis del desierto del Monte, los incrementos máximos de área basal en individuos con múltiples tallos ocurrieron entre los 40 y los 80 años de edad, con valores significativamente inferiores respecto a los determinados en el presente trabajo (5 cm^2), atribuible a las escasas precipitaciones anuales que caracterizan a esa región. Por su parte, en individuos monofustes, el máximo incremento corriente en biomasa seca fue de $1,5 \text{ kg año}^{-1}$ y ocurrió después de los 80 años (Álvarez et al., 2011).

Tabla 6. Incrementos corrientes anuales de área basal (ICA_{ab}) y biomasa seca (ICA_B) por etapa del período de crecimiento.

	Período de edad (años)						
	1-41,9*	1-10	11-20	21-30	31-40	41-50	51-59
ICA_{ab} ($\text{cm}^2 \text{ año}^{-1}$)	8,24	1,21	6,30	11,77	12,25	15,93	26,89
ICA_B (kg año^{-1})	3,93	0,22	1,98	5,52	6,74	11,57	16,70

*Período de crecimiento completo (1 año hasta la edad media de los individuos evaluados)

Los individuos de *N. nigra* estudiados continúan incrementando su ICA_{ab} e ICA_B al menos hasta los 59 años (máxima edad registrada en 3 individuos), edad en la que se determinó valores de $36,4 \text{ cm}^2 \text{ año}^{-1}$ y $27,30 \text{ kg año}^{-1}$ de ICA_{ab} e ICA_B , respectivamente (Fig. 9). Esto determina que el punto de intercepción de las curvas de IMA e ICA no se alcance a la máxima edad evaluada, indicando que la culminación biológica del crecimiento ocurre a edades más avanzadas (> 59 años). Esto indica que, de implementar los valores orientativos de 25-30 cm de DMC sugeridos para las especies del Espinal (que se alcanza a los 50-55 años de edad), se estaría interviniendo en pleno crecimiento de los individuos, antes de alcanzar el turno biológico de corta.

Nuestros resultados son comparables con estudios previos en otras especies de *Neltuma*, que reportan turnos biológicos de corta a edades avanzadas, indicando las relativas bajas tasas de crecimiento de estas especies. En el Chaco Semiárido, la culminación biológica de *N. nigra* no ocurrió aún a los 95 años de edad (Giménez et al.,

2003), mientras que para *N. caldenia* en el Espinal (Distrito del Caldén), ocurrió a edades iguales o mayores a 66 años (Bogino y Villalba, 2008). En el desierto del Monte (con precipitaciones anuales de 150 mm), la edad de culminación del crecimiento en *N. flexuosa* resultó mayor a los 104 años en individuos monofustes, mientras que en individuos multifustes ocurrió alrededor de los 80 años de edad (Álvarez et al., 2011). En contraste, estudios sobre crecimiento de *Neltuma ruscifolia* (Griseb.) C.E. Hughes & G.P. Lewis en el Chaco Árido, determinaron edades de culminación de 11 años (Juárez et al., 2007) y 45 años (Giménez et al., 2009), edades significativamente inferiores a otras especies del mismo género.

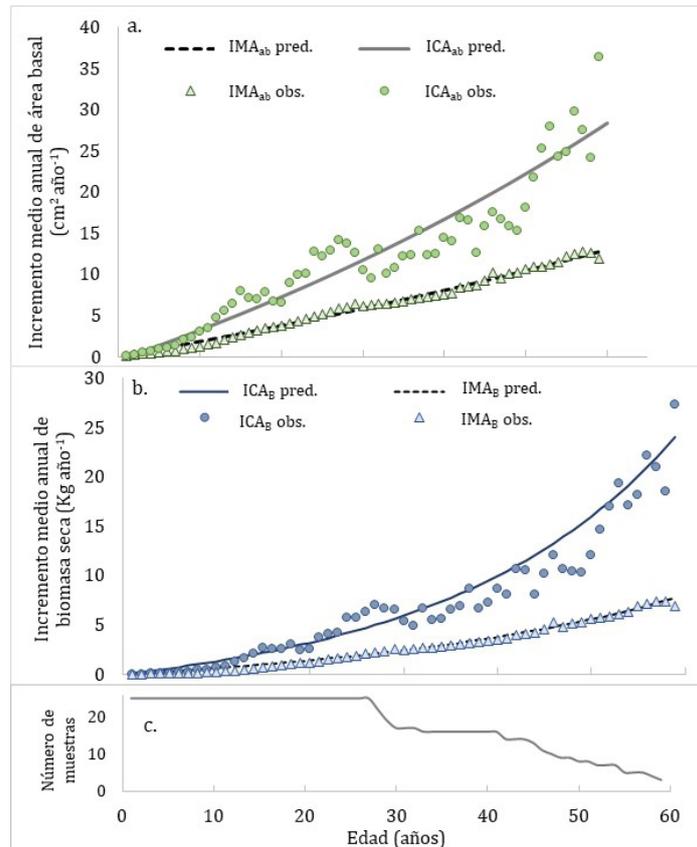


Figura 9. Incremento medio anual (IMA) e incremento corriente anual (ICA) de: a) área basal (cm^2) y b) biomasa seca (kg); c) Número de árboles evaluados. Donde: IMA_{ab} obs. e ICA_{ab} obs. corresponde a valores de IMA e ICA de área basal observados, respectivamente; IMA_B obs. e ICA_B obs. corresponde a valores de IMA e ICA de biomasa seca observados, respectivamente.

Tasa anual de acumulación de carbono en individuos arbóreos

En la figura 10 se observan las trayectorias de acumulación anual de carbono a lo largo de la edad de cada uno de los 25 árboles de *N. nigra* evaluados. Cabe destacar las diferencias explícitas en la acumulación anual de C entre años adyacentes. Para todos los árboles, la acumulación anual de C se caracteriza por bajas tasas a edades tempranas, seguidas de tasas crecientes en edades más avanzadas. Además, se puede observar que los individuos evaluados presentan diferentes patrones de acumulación de C a lo largo de su vida. Por ejemplo, los individuos 4 y 10 mantienen un incremento sostenido de la acumulación de C con el aumento de la edad. Por el contrario, los árboles 20, 24 y 25 mantienen tasas de acumulación anual de C relativamente uniformes a lo largo de su vida. Este comportamiento coincide con lo reportado por Kohl et al.

(2017) para especies arbóreas tropicales de bosques naturales.

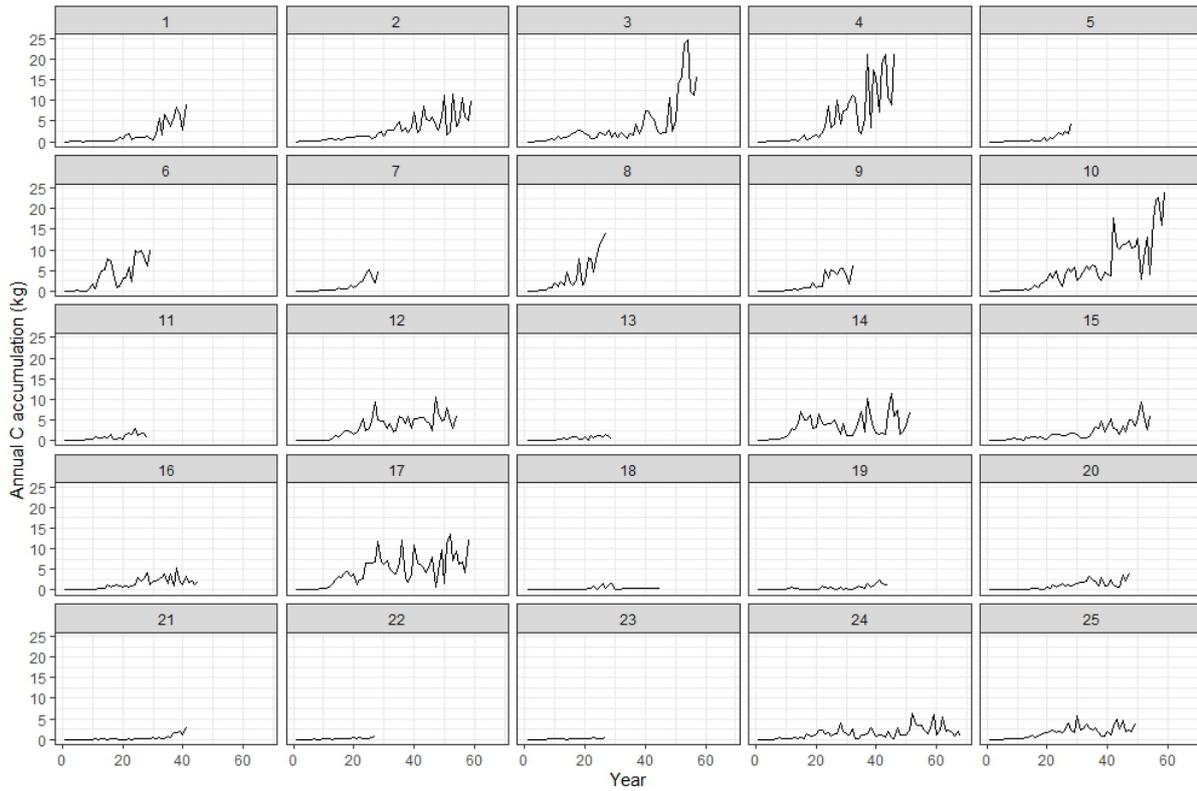


Figura 10. Acumulación anual de C en individuos de *Neltuma nigra*. La acumulación anual de C se representa gráficamente a lo largo de la edad del árbol. Los números que se indican en la parte superior de cada cuadro refiere al número de individuo

La acumulación anual promedio de C resultó de 2,92 kg C ind⁻¹ año⁻¹. En la Tabla 7 se presentan los valores promedio de acumulación de C, en las diferentes etapas de la vida de los individuos, observándose que aún a la edad de 45 años el individuo sigue incrementando la acumulación anual de C.

Tabla 7. Tasa anual de almacenamiento de biomasa y C por individuo de *N. nigra*. Los números negros indican acumulación anual de biomasa (kg ind⁻¹ año⁻¹) y los números resaltados en rojo indican las tasas anuales de acumulación de C por individuo (kg C ind⁻¹ año⁻¹)

Edad media (años)	Período edad 1-5	Período edad 6-10	Período edad 11-15	Período edad 16-20	Período edad 21-25	Período edad 26-30	Período edad 31-35	Período edad 36-40	Período edad 41-45
41.9	0.05	0.39	1.71	2.62	4.68	6.36	5.84	7.64	9.48
	0.024	0.19	0.82	1.26	2.25	3.05	2.80	3.67	4.55

Conclusiones

La información generada en este proyecto aporta a la valoración del servicio ecosistémico que proveen los bosques nativos del Espinal entrerriano en la captura y fijación de CO₂ atmosférico. Se pudo determinar que estos bosques almacenan, en promedio, 102,4 MgC ha⁻¹. La reserva de C de la biomasa arbórea por unidad de superficie varía ampliamente, oscilando entre un mínimo de 11,0 y un máximo de 44,7 Mg ha⁻¹. La reserva de COS en los primeros 30 cm es la mayor reserva de C en estos bosques, representando más del 70% de la reserva total. Por lo tanto, es clave prestar más atención a esta reserva de C en las políticas de mitigación del CC.

A partir de los resultados obtenidos se acepta la hipótesis que enuncia que es posible estimar el C almacenado en la biomasa arbórea de bosques nativos del Espinal (Entre Ríos) mediante la utilización de modelos alométricos y fracción de C obtenidos en la región. Además, se observó que la fisonomía y la composición florística afectaron el stock de C en la biomasa arbórea pero no las reservas de COS, por lo que se acepta parcialmente la segunda hipótesis planteada. La cobertura arbórea y el área basal resultaron las variables de mayor efecto sobre la reserva de C en la biomasa arbórea, mientras que el stock de C en el suelo estuvo definido por el contenido de arcilla, la pendiente y la capacidad de intercambio catiónico del suelo.

Este trabajo muestra la aplicabilidad del análisis dendrocronológico para evaluaciones de la dinámica del crecimiento en área basal, biomasa y acumulación anual de carbono en individuos arbóreos. El crecimiento radial medio de *Neltuma nigra* fue de 2,28 mm año⁻¹ (0,4-4,86 mm año⁻¹), pudiendo ser considerada una especie de crecimiento intermedio para el área de estudio. Los incrementos corrientes anuales de área basal (ICAab), biomasa (ICAB) y por ende C, resultaron bajos durante los primeros 10 años y aumentaron, al menos, hasta los 59 años. Si bien los individuos de *N. nigra* evaluados a partir del análisis dendrocronológico, evidenciaron diferentes patrones de acumulación de C a lo largo de su vida, en todos los árboles se determinaron bajas tasas anuales de acumulación de C a edades temprana, seguidas de tasas crecientes en edades más avanzadas. Este comportamiento permite aceptar la tercera hipótesis que indica que la tasa de captura anual de C varía según la edad de los individuos arbóreos. La acumulación anual promedio de C en individuos de *N. nigra* resultó de 2,92 kg C ind⁻¹ año⁻¹ a lo largo de su vida.

Nuestros resultados pueden ser de utilidad para mejorar los modelos de almacenamiento de carbono y las predicciones sobre las consecuencias del CC, el cambio de uso del suelo y la degradación de los bosques, así como para el desarrollo de políticas regionales de reducción de emisiones por deforestación y degradación forestal.

Indicadores de Producción

Publicaciones con referato

Sione, S.M.; Ledesma, S.G.; Rosenberger, L.J.; Oszust, J.D. 2019. Relaciones alométricas en *Neltuma affinis* Spreng. en bosques nativos del Espinal, Entre Ríos, Argentina. Revista Científica Agropecuaria 23 (2): 19-29.

- Sione, S.M.; Ledesma, S.G., Rosenberger, L.J.; Oszust, J.D.; Andrade, H.J.; Maciel, G.O.; Wilson, M.G. y M.C. Sasal. 2020. Ecuaciones alométricas de biomasa aérea para *Neltuma nigra* Hieron. "algarrobo negro" (Fabaceae) en bosques de Entre Ríos (Argentina). *Agronomía & Ambiente* 40 (1): 63-76.
- Sione, S.M.; Ledesma, S.G., Rosenberger, L.J.; Oszust, J.D.; Andrade, H.J.; Maciel, G.O.; Wilson, M.G. 2020. Modelos alométricos de biomasa para *Vachellia caven* Mol. Molina en bosques nativos del Espinal (Argentina). *Quebracho* 28 (1,2). Aceptado para su publicación
- Sione, S.M.; Ledesma, S.G.; Rosenberger, L.J.; Oszust, J.D. 2020. Herramientas para la estimación de las reservas de carbono en bosques nativos del Espinal. Contribución de REDFORar a la Revista Argentina Forestal. Disponible en: <https://www.argentinaforestal.com/2020/12/30/herramientas-para-la-estimacion-de-las-reservas-de-carbono-en-bosques-nativos-del-espinal/>
- Ledesma, S.G., Sione, S.M.; Oszust, J.D. y L.J. Rosenberger. Estimación del contenido y captura potencial de carbono en la biomasa arbórea de bosques nativos del Espinal (Entre Ríos, Argentina). 2021. *Revista FAVE Sección Cs Agrarias* 20 (1) DOI: <https://doi.org/10.14409/fa.v20i1.10274>
- Andrade, H.J.; Wilson, M.G.; Rosenberger, L.J.; Sasal, M.C.; Ledesma, S.G.; Gabioud, E.A. 2021. Reducción de emisiones de carbono por deforestación evitada en bosques del Espinal (Entre Ríos, Argentina). *Colombia Forestal* 24 (2): 39-51.
- Sione, S.M.; Ledesma, S.G.; Rosenberger, L.J.; Oszust, J.D.; Maciel, G.O.; Wilson, M.G.; Andrade, H.J.; Sasal, M.C. 2022. Stock de carbono en especies arbóreas del Espinal entrerriano. *Suplemento Ciencia, Docencia y Tecnología* 12 (13): 1-35. Disponible en: <http://id.caicyt.gov.ar/ark:/s22504559/1pkod656v>
- Sione, S.M.; Ledesma, S.G.; Aceñolaza, P.G.; Wilson, M.G. 2022. Biomass Carbon and Nitrogen allocation in different tree species: do tree compartments and size affect C:N relationship? *Silva Fennica* 56 (4) article id 10757. <https://doi.org/10.14214/sf.10757>
- Sione, S.M.J., Wilson, M.G., Ledesma, S.G., Gabioud, E.A., Rosenberger, L.J., Oszust, J.D. 2023. Driving factors of tree biomass and soil carbon pool in xerophytic forests of northeastern Argentina. *Ecological Processes* 12, 64 (2023). <https://doi.org/10.1186/s13717-023-00478-1>
- Sione, S.M.; Villalba, R.; Srur, A.M.; Aceñolaza, P.G. 2024. Dendrochronological and dendroclimatological potential of *Neltuma nigra* (Griseb.) C.E. Hughes & G.P. Lewis. in argentinian northeast. *Dendrochronologia* 88, 126239. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2024.126239>

Libros como coautor

- Sione, S.M.; Ledesma, S.G.; Rosenberger, L.J.; Oszust, J.D. 2020. Herramientas para la estimación de las reservas de carbono en bosques nativos del Espinal. En: Lupi, A.M.; Area, M.C.; Escobar, P. (Eds.) *Ciencia y Tecnología Forestal en Argentina*. 1ª. ed. CONICET.
- Rojido, I.; Canavelli, S.B.; Anderson, C.B.; Aceñolaza, P.G.; Sione, S.M.; Barzan, F.R.; Dardanelli, S.; Calamari, N.C.; Lezana, L.C. 2022. El Espinal entrerriano: una perspectiva integral para su cuidado. Ediciones INTA, Buenos Aires. 47 p. Disponible en: [El espinal entrerriano: una perspectiva integral para su cuidado \(inta.gob.ar\)](http://inta.gob.ar)
- Wilson, M.G.; Gabioud, E.A.; Sasal, M.C.; Van Opstal, N.V.; Sione, S.M. 2023. Neutralidad de la degradación de la tierra en bosques nativos del Espinal. En: Lupi, A.M.; Area, M.C.; Escobar, P. (Eds.) *Ciencia y Tecnología Forestal en Argentina*. 1ª. ed. CONICET.

Presentaciones en Jornadas y Congresos Nacionales

- Sione, S.M.; Ledesma, S.G., Rosenberger, L.J.; Oszust, J.D.; Andrade, H.J.; Maciel, G.O. y M.G. Wilson. 2020. Ecuaciones alométricas de biomasa aérea para *Vachellia caven* (Molina) Seigler & Ebinger en bosques nativos del Espinal entrerriano. Presentado en: XXXIV Jornadas Forestales de Entre Ríos (Modalidad oral) Concordia, octubre 2020
- Sione, S.M.; Ledesma, S.G.; Rosenberger, L.J.; Oszust, J.D. 2021. Relación altura-diámetro en *Neltuma affinis* Spreng. en bosques nativos del Espinal. Presentado en: XVIII Jornadas Argentinas de Botánica Oro Verde, Entre Ríos. 6-8 Setiembre 2021 (Modalidad virtual)
- Sione, S.M.; Ledesma, S.G.; Rosenberger, L.J.; Oszust, J.D.; Cattaneo Hildt, M. 2022. Regeneración arbórea nativa en áreas boscosas del Espinal. Presentado en: XXXVI Jornadas Forestales de Entre Ríos Concordia, Entre Ríos. Octubre 2022.
- Wilson, M.G.; Wingeyer, A.B.; Gabioud, E.A.; Sasal, M.C.; Sione, S.M.; Lezana, L.C. 2022. Estado de salud de los suelos del área de bosques nativos del Espinal. Presentado en: XXVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo Buenos Aires, noviembre 2022.
- Piani, V.; Zamboni, L.P.; Sione, W.; Sione, S.M.; Aceñolaza, P.G. 2023. Almacenamiento de carbono en sistemas productivos forestales del sur mesopotámico. Presentado en: XXXIX Jornadas Argentinas de Botánica Catamarca, Setiembre 2023.
- Ledesma, S.G.; Sione, S.M.; Oszust, J.D.; Wilson, M.G.; Rosenberger, L.J. 2023. ¿Cómo influye la fisonomía de los bosques nativos en la reserva de carbono? Presentado en: Reunión de Investigación, Extensión y Docencia 2023 FCA UNE. Oro Verde, Setiembre 2023.
- Sione, S.M.; Wilson, M.G.; Ledesma, S.G.; Oszust, J.D.; Rosenberger, L.J.; Gabioud, E.A. 2023. ¿Influye la estructura forestal en las reservas edáficas de carbono en el Espinal? Presentado en: XXX Reunión Argentina de Ecología Bariloche, octubre 2023.

Presentaciones en Jornadas y Congresos Internacionales

- Sione, S.M.; Ledesma, S.G.; Rosenberger, L.J.; Oszust, J.D. y M.G. Wilson. Contenido de carbono en la biomasa de *Neltuma nigra* (Griseb.) Hieron y *Vachellia caven* (Molina) Seigler & Ebinger, en un Vertisol del área de bosques de Entre Ríos (Argentina). Modalidad: Poster
- Presentado en: X Congreso sobre Uso y manejo del Suelo UMS 2020. La Coruña (España), noviembre 16-19 2020 (Modalidad virtual)
- Sione, S.M.; Wilson, M.G.; Gaitán, J.J.; Pioto, A.C. y S.G. Ledesma. Pérdida de áreas boscosas en la Cuenca del Arroyo Feliciano (Entre ríos, Argentina) en el período 2006-2017 Modalidad: Oral. Presentado en: X Congreso sobre Uso y manejo del Suelo UMS 2020. La Coruña (España), noviembre 16-19 2020 (Modalidad virtual)
- Sione, S.M.; Wilson, M.G.; Ledesma, S.G.; Oszust, J.D.; Rosenberger, L.J.; Gabioud, E.A.; Cattaneo Hildt, M. Relación entre las reservas de carbono en árboles y suelos de bosques semixerofíticos del Espinal. Presentado en: VIII Congreso Forestal Latinoamericano y V Congreso Forestal Argentino. Mendoza, 27-30 marzo 2023.
- Sione, S.M.; Villalba, Ricardo; Srur, A.M.; Aceñolaza, P.G. Crecimiento en área basal y en biomasa de *Neltuma nigra*: su evaluación a partir del análisis dendrocronológico. Presentado en: VIII Congreso Forestal Latinoamericano y V Congreso Forestal Argentino. Mendoza, 27-30 marzo 2023.

Ana Srur, Ricardo Villalba , Alejandro Martínez-Meier , Reinhardt Brand , Mariano Amoro-
roso , Juan Alvarez , Lucas Bianchi , Cecilia Blundo , Stella Bogino , Julieta Carilla ,
Martina Chacón ,Guillermina Dalla-Salla , Valérie Daux, Juan Diez , Eugenia Ferrero,
Amaru Magnin, Agustina Malizia, Mariano Morales, Ignacio Mundo, Pablo Peri, Pedro
Pitte, Peter Prislán; Juan Quesada, Marcos Radins, Milagros Rodríguez Catón , Anne So-
phie Sergent , Silvana Sione, Leticia Vega, Pablo E. Villagra , Daiana Wouters. Monito-
reo del crecimiento arbóreo en bosques nativos argentinos. Una valiosa herramienta
para estimar los impactos del cambio climático. Presentado en: VIII Congreso Forestal
Latinoamericano y V Congreso Forestal Argentino. Mendoza, 27-30 marzo 2023.

Bibliografía

- Ahirwal J, Nath A, Brahma B, Deb S, Kumar Sahoo U, Jyoti Nath A (2021) Patterns and driv-
ing factors of biomass carbon and soil organic carbon stock in the Indian Himalayan
region. *Sci Total Environ* 770. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145292>
- Andrade, H.J. 2012. Principios de la contabilidad y establecimiento de línea base de car-
bono. Curso dictado en Chaco, Argentina. Marzo/2012. Andrade, HJ; Marín, LM; Pachón,
DP. 2014. Fijación de carbono y porcentaje de sombra en sistemas de producción de
café (*Coffea arabica* L.) en el Líbano, Tolima, Colombia. *Bioagro* 26(2): 127-132.
- Aryal S, Shrestha S, Maraseni T, Wagle PC, Gaire NP (2018) Carbon stock and its rela-
tionships with tree diversity and density in community forests in Nepal. *International
Forestry Review* 20 (3): 263-273. <https://www.jstor.org/stable/26855480>
- Bouza, M.; Aranda-Rickert, A.; Brizuela, M.; Wilson, M.G.; Sasal, M.C.; Sione, S.M.J.; Beghe-
tto, S.; Gabioud, E.; Oszust, J.; Bran, D.; Velazco, V.; Gaitan, J.; Silenzi, J.; Echeverría, N.;
De Lucia, M.; Iurman, D.; Vanzolini, J.; Castoldi, F.; Hormaeche, J.; Johnson, T.; Meyer,
S. and E. Nkonya. (2016). Economics of Land Degradation in Argentina. In *Economic
of land degradation and improvement – A global assessment for sustainable devel-
opment* (E. Nkonya, A Mirzabaev and J. von Braun, eds). ISBN 978-3- 319-19167-6.
Springer open 2016.pp 291-326.
- Bonino EE (2006) Changes in carbon pools associated with a land-use gradient in the
dry Chaco, Argentina. *For Ecol Manage* 223: 183-189.
- Brown, S., Gillespie, A.J.R. & Lugo, A.E. 1989. Biomass estimation methods for tropical
forests with applications to forest inventory data. *Forest Science*, 35(4): 881-902.
- Brown, S. 1997. Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer.
FAO Forestry Paper vol. 134, 55 p. Cabrera, A.L. 1976. Regiones fitogeográficas argen-
tinas. *Enciclopedia Argentina de Agricultura y Jardinería*. 12a. Edición. Tomo II, Fas. I.
Ed. ACME. S.A.C.I. BS. As. 85 pp.
- Conti G, Pérez-Harguindeguy N, Quetier F, Gorné LD, Jaureguiberry P, Bertone GA, Enri-
co L, Cuchietti A, Díaz S (2014) Large changes in carbon storage under different land-
use regimes in subtropical seasonally dry forests of southern South America. *Agric
Ecosyst Environ* 197: 68-76. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.07.025>
- Chamochumbi, W. 2006. Ordenamiento de las cuencas hidrográficas de la región andi-
na. <http://www.ecoportel.net/content/view/full/65604> [Consulta 31/05/2010].
- Díaz, E.; Romero, E.; Boschetti, N, y O. Duarte. 2009. Vulnerabilidad del agua subter-
ránea en la cuenca del Arroyo Feliciano. *Entre Ríos. Argentina. Boletín Geológico y
Minero*, 120 (4): 533-542.

- Dimobe K, Kuyah S, Dabré Z, Ouédraogo A, Thiombiano A (2019) Diversity-carbon stock relationship across vegetation types in W National park in Burkina Faso. *For Ecol Manag* 438 (6360): 246-254. DOI: 10.1016/j.foreco.2019.02.027
- Di Rienzo, J.W.; Robledo, M.; Balzarini, F.; Casanoves, M.; Tablada, E.; & González, L. 2008. INFOSTAT Software Estadístico. Manual del Usuario. <http://www.tec-digital.itcr.ac.cr/file/3119766/manual>
- Dussart, E., Medina, A., Bogino, S. 2015. Dendroecología en la pampa Argentina: investigaciones actuales, pasadas y futuros desafíos. *Ecosistemas* 24(2): 51-59.
- Fritts, H.C. 2001. *Tree Rings and Climate*. Blackburn Press, Cadwell, Estados Unidos.
- Gasparri I, Manghi F (2004) Estimación de volumen, biomasa y contenido de carbono de las regiones forestales argentinas (Informe Final). Unidad de Manejo del Sistema de Evaluación Forestal. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable. Ministerio de Salud y Ambiente. 26 p
- Gasparri N, Grau H, Manghi E (2008) Carbon pools and emissions from deforestation in extra-tropical forests of northern Argentina between 1900 and 2005. *Ecosystems* 11: 1247-1261.
- Gayoso, J.; Guerra, J. & Alarcón, D. (2002). Contenido de carbono y funciones de biomasa en especies nativas y exóticas. Valdivia, Chile. http://mingaonline.uach.cl/scielo.php?pid=S071792002005000200005&script=sci_arttext
- Gibbs, H.K., Brown, S., Niles, J.O. & Foley, J.A. 2007. Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks: making REDD a reality. *Environmental Research Letters*, 2(4): 1-13. Doi:10.1088/1748-9326/2/4/045023.
- Giménez, A.M.; Hernández, P.; Ríos, N.; Calatayu, F. 2013. Crecimiento de árboles individuales de *Geoffroea decorticans* Burk. en un bosque del Chaco semiárido. *Madera y Bosques* 19 (1): 37-51.
- GOFC-GOLD. 2009. Reducing greenhouse gas emissions from deforestation and 46 degradation in developing countries: a sourcebook of methods and procedures 47 for monitoring, measuring and reporting, GOFC-GOLD Report version COP14-2, 48 (GOFC-GOLD Project Office, Natural Resources Canada, Alberta, Canada).
- González Roglich M, Swenson JF, Jobbágy EG, Jackson RB (2014) Shifting carbon pools along a plant cover gradient in woody encroached savannas of central Argentina. *For Ecol Manag* 331: 71-78. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.07.035>
- Gutiérrez, E. 2009. La dendrocronología: métodos y aplicaciones. En "Arqueología náutica mediterránea" X. Nieto i M.A. Cau (eds.). Monografies del CASC. Catalunya. pp. 309-322.
- IPCC. 2003. Intergovernmental Panel Climate Change. Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change, and Forestry. Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Japan. IPCC. 2006. Capítulo 2: Metodologías Genéricas Aplicables a las Múltiples Categorías de Uso de la Tierra. Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Vol. 4. Agricultura, Silvicultura y otros Usos de la Tierra. Consultado el 27 agosto de 2015. http://www.ipccnggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/pdf/4_Volume4/V4_02_Ch2_Generic.pdf
- IPCC. Climate Change 2007. Mitigation. Technical Summary. Cambridge, UK and New York, USA, Cambridge University Press, 2007.
- Jobbágy EG, Jackson RB (2000) The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecol Applic* 10: 423-436

- Ledesma, S. G.; Muracciole, B. D.; Dorsch, A. F.; Sabattini, R. A.; Cottani, F. J.; Sione, S. M.; Fortini, C. 2007. Caracterización estructural de montes nativos de Entre Ríos. *RCA* 11(2): 129-139.
- Ledesma, S.; Sione, S.; Oszust, J.; Rosenberger, L. y M. Wilson. 2017. Índice agroambiental para la evaluación del impacto por cambio de uso del suelo a nivel predial en agroecosistemas del Espinal entrerriano. *Revista Agronomía & Ambiente*: 37 (1) 43-64.
- Lenzi, M.L. 2017. Evaluación del impacto del cambio climático en los procesos hidrológicos de la Cuenca del Arroyo Feliciano, Entre Ríos, Argentina. Tesis Doctoral. Universidad de la Coruña, España. 147 p.
- Malhi, Y.; Wood, D., Baker, T. R., Wright, J., Phillips, O. L., Cochrane, T., Meir, P., Chave, J., Almeida, S., Arroyo, L., Higuchi, N., Killen, T. J., Laurance, s.; Laurance, W. ; Lewis, S.; Monteagudo, A.; Neill, D.; Núñez Vargas, P., Pitman, N. C. A., Quesada, C. A., Saloma O, R., Silva, J. N. M., 2006. The regional variation of aboveground live biomass in old-growth Amazonian forests. *Global Change Biology* 12:1107– 1138.
- Montico, S. 2002. Manejo integrado de Cuencas Hidrográficas Rurales: Base para el ordenamiento territorial. *Revista Agromensajes*, 7, marzo 2002. UNR. http://www.fcagr.unr.edu.ar/Extension/Agro_mensajes/07/4AM7.htm
- Manrique S, Franco J, Núñez V, Seghezzo L (2011) Potential of native forests for the mitigation of greenhouse gases in Salta, Argentina. *Biomass Bioenerg* 35: 2184–2193.
- Ordóñez B., H. J. De Jong y O. Maser. 2001. Almacenamiento de carbono en un bosque de *Pinus pseudostrobus*, Michoacán. *Madera y Bosques* 7(2):27-47.
- Osei R, del Río M, Ruiz-Peinado R, Titeux H, Bielak K, Bravo F, Collet C, Cools C, Cornelis JT, Drössler L, Heym M, Korboulewsky N, Löf1 M, Muys B, Najib Y, Nothdurft A, Pretzsch H, Skrzyszewski J, Ponette Q (2022) The distribution of carbon stocks between tree woody biomass and soil differs between Scots pine and broadleaved species (beech, oak) in European forests. *Eur J For Res* 141:467–480. <https://doi.org/10.1007/s10342-022-01453-9>
- Pan YD, Birdsey RA, Fang JY, Houghton R, Kauppi PE, Kurz WA, et al. (2011) Large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science* 333, 988–993. doi: 10.1126/science.1201609
- Paul EA (1984) Dynamics of soil organic matter. *Plant Soil* 76:275–285.
- Plan Mapa de Suelos de la provincia de Entre Ríos. 1984. Convenio INTA-Gobierno de Entre Ríos. Suelos y erosión de la provincia de Entre Ríos. Segunda Ed. Tomo I. Serie Relevamiento de Recursos Naturales (1) INTA-EEA Paraná. Entre Ríos. 112 pp.
- Risio Allione, L. 2014. Impacto de cambios climáticos y ambientales en el crecimiento y la respuesta fisiológica de *Neltuma caldenia* (BURKART). Tesis Doctoral. Universidad de Valladolid. 309 p.
- Sabattini, R.A.; Ledesma, S.; Sione, S.M. y J. Sabattini. 2013. Ordenamiento territorial de bosques nativos en la cuenca del Arroyo Feliciano (Entre Ríos) En: Bases conceptuales y metodológicas para el Ordenamiento Territorial en el Medio Rural. Región Centro Argentina (Giayetto, O, Plevich J, Lallana, V y M Pilatti, comp., 672 p). 313-331. ISBN 978-987-29233-0-3.
- Sabattini, R.A.; Sione, S. M. J.; Ledesma, S. G.; Sabattini, J.; Wilson, M. G. 2016. Estimación de la pérdida de superficie de bosques nativos y tasa de deforestación en la Cuenca del Arroyo Estacas (Entre Ríos, Argentina). *RCA* 20: 45-56.
- Sasal, M.C.; Wilson, M.G.; Bedendo, D.J. y G. Schulz. 2015. Capítulo Provincia de Entre Ríos. En: *El Deterioro del Suelo y del Ambiente en la Argentina* (Casas, R. y G. Albaracín, eds.). PROSA, FECIC, INTA. 111-120. ISBN 978-950-9149-39-7.

- Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación (2007). Primer Inventario Nacional de Bosques Nativos. 2da. Etapa: Inventario de campo de la Región del Espinal (Distritos del Caldén y del Ñandubay). BIRF 4085 AR. 236 p y un Anexo.
- Segura, M. & Kanninen, M. (2005). Allometric models for tree volume and total aboveground biomass in a tropical humid forest in Costa Rica. *Revista Biotropica*, 37(1), 2-8.
- Segura, M. & Andrade, H. (2008). ¿Cómo construir modelos alométricos de volumen, biomasa o carbono de especies leñosas perennes? *Revista Agroforestería de las Américas*, 46, 89-96.
- Sheikh MA, Kumar M, Todaria NP, Pandey R (2020) Biomass and soil carbon along altitudinal gradients in temperate *Cedrus deodara* forests in central Himalaya, India: implications for climate change mitigation. *Ecol Indic* 111. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.106025>
- Sione, S.M.; Sabattini, R.A.; Ledesma, S.G.; Dorsch, A.F.; Fortini, C. 2006. Caracterización florística y estructural del estrato arbustivo de un monte en pastoreo (Las Garzas, Entre Ríos). *RCA* 10:59-67.
- Sione, S.; Sabattini, R.; Ledesma, S. y A. Dorsch. 2011. Incremento anual de área basal de *Neltuma nigra* Griseb., *Neltuma affinis* Sprengel. y *Acacia caven* (Mol.) Molina. en función de la densidad arbórea y estructura de clases diamétricas, en bosques nativos de E. Ríos. *Revista Yvyretá* 18:1-8.
- Sione, S.; Ledesma, S.G.; Rosenberger, J.; Galliussi, R.; Sabattini, R. 2016. Banco de semillas del suelo, en relación a dos estados sucesionales del bosque nativo en Entre Ríos. *Quebracho* 23(1,2):62-76.
- Sione, S.; Ledesma, S.G.; Rosenberger, J.; Wilson, M.G.; Sabattini, R. 2016. Banco de semillas del suelo en un área de bosques nativos sujeta a cambio en el uso de la tierra (Entre Ríos, Argentina). *Revista FAVE Sección Agrarias* 15 (1). Disponible en http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1666-77192016000100008&lng=es&nrm=iso
- Sione, SM; Andrade Castañeda, H.; Ledesma, SG; Rosenberger, L.J.; Oszust, J; Wilson, MG. 2019a. Aerial biomass allometric models for *Neltuma affinis* Sprengel. in Espinal native forest of Argentina. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental Agriambi*, 23 (6): 467 - 473.
- Sione, SM; Ledesma, SG; Rosenberger, L.J.; Oszust, J.D.; Carpp, I.A.; Wilson, M.G.; Andrade Castañeda, H.; J; asal, M.C. 2021b. Fracción de carbono en la biomasa de *Neltuma affinis* Sprengel (Fabaceae) en un bosque nativo del Espinal (Argentina). *Agronomía & Ambiente* 39(1).
- Snowdon P.; Raison J.; Keith H.; Montagu K.; Bi K.; Ritson P.; Grierson P.; Adams M.; Burrows W. and D. Eamus. 2001. Protocol for sampling tree and stand biomass. National carbon accounting system technical report No. 31 Draft-March 2001. Australian Greenhouse Office. 114 p.
- Walkley, A. and I. Black. 1934. An examination of the Degtjareff method for the determining soil organic matter and proposed modification of the chromic titration method. *Soil Sci.* 37: 29-38.
- Wilson MG. 2007. Uso de la Tierra en el área de bosques nativos de Entre Ríos, Argentina. Tesis Doctoral. Universidad de la Coruña, España. 277 p.
- Wilson, M.G.; Asal, M.C.; Gabioud, E.A.; Garciarena, N.; Sione, S.M.J.; Oszust, J.; Bedendo, D.J.; Tasi, H. y A. Paz González (2017). Ecorregión Mesopotámica. Centro-Norte de Entre Ríos. Sistemas productivo ganadero agrícola del área de bosques nativos. En *Manual de Indicadores de calidad del suelo para las Ecorregiones de Argentina* (M.G. Wilson ed. y comp.). Ediciones INTA. 233-237

PID 2223

Denominación del Proyecto

Captura y fijación de carbono como servicio ambiental de los bosques nativos del espinal

Directora

Silvana María José SIONE

Codirectora:

Silvia Gabriela LEDESMA

Unidad de Ejecución

Universidad Nacional de Entre Ríos

Dependencia

Facultad de Ciencias Agropecuarias

Contacto

silvana.sione@uner.edu.ar

Cátedra/s, área o disciplina científica

Cátedra de Ecología de los Sistemas Agropecuarios (Departamento Ciencias de la Tierra)

Instituciones intervinientes públicas o privadas:

Facultad de Ciencias Agropecuarias UNER

Ruta 11 km 10.5 (3101) Oro Verde, Entre Ríos. Instituto Nacional de Tecnología

Agropecuaria (INTA) EEA Paraná Ruta 11 Km 12.5 (3101) Oro Verde, Entre Ríos

Convenios o acuerdos debidamente acreditados: ACTA ACUERDO FCA-UNER Y

EEA INTA PARANÁ para la ejecución del Proyecto PID UNER N° 2223 "Captura y

fijación de carbono como servicio ambiental de los bosques nativos del Espinal".

Firmado en octubre de 2021. Convenio Marco: INTA – UNER (11/07/2001)

Integrantes del proyecto

Docentes UNER: ROSENBERGER, Leandro Javier. OSZUST, José Daniel. Integran-

tes externos: WILSON, Marcelo Germán (INTA), SASAL, María Carolina. Becaria:

Araceli Magalí CATTANEO HILDT

Fechas de iniciación y de finalización efectivas

02 marzo 2020 y 22 enero 2024 (prórroga automática por el mismo plazo transcurrido entre la fecha de aplicación y de finalización del Decreto 297/2020, por contexto de pandemia COVID-19).

Aprobación del Informe Final por Resolución C.S. N° 246/24 (30-08-2024)